

Lucas Debatin Vieira

**CARACTERIZAÇÃO DOS TIPOS DE POROSIDADE EM
ROCHAS VULCÂNICAS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL POR
MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X DE RADIAÇÃO
SÍNCROTRON**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido(a) à disciplina de TCC II
do Curso de Geologia da Universidade
Federal de Santa Catarina como
requisito parcial para a obtenção do
Grau de Bacharel em Geologia

Orientador: Prof. Dr. Breno Leitão
Waichel

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vieira, Lucas Debatin

CARACTERIZAÇÃO DOS TIPOS DE POROSIDADE EM ROCHAS
VULCÂNICAS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL POR MICROTOMOGRAFIA DE
RAIOS X DE RADIAÇÃO SÍNCROTRON / Lucas Debatin Vieira ;
orientador, Breno Leitão Waichel - Florianópolis, SC, 2016.
107 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de
Filosofia e Ciências Humanas. Graduação em Geologia.

Inclui referências

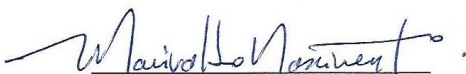
1. Geologia. 2. Rochas Vulcânicas. 3. Microtomografia de
Raios-X. 4. Porosidade. I. Waichel, Breno Leitão. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Geologia. III. Título.

Lucas Debatin Vieira

**CARACTERIZAÇÃO DOS TIPOS DE POROSIDADE EM
ROCHAS VULCÂNICAS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL POR
MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS X DE RADIAÇÃO
SÍNCROTRON**

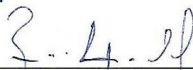
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Geologia e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Geologia.

Florianópolis, 08 de dezembro de 2016.



Prof. Dr. Marivaldo dos Santos Nascimento
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

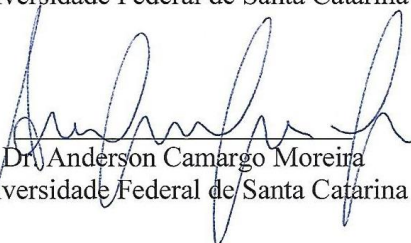


Prof. Dr. Breno Leirão Waichel
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Roberto Sacks de Campos
Universidade Federal de Santa Catarina



Dr. Anderson Camargo Moreira
Universidade Federal de Santa Catarina

À minha família . . .

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo apoio, incentivo e compreensão ao longo dos anos.

Ao professor, orientador e amigo Breno Leitão Waichel, pela dedicação e suporte dados a este trabalho.

Aos membros da banca, por se disporem a avaliar este trabalho.

Aos amigos e colegas de trabalho do LABLAM/UFSC, em especial ao Lucas e ao Mateus, por compartilharem seu tempo nas discussões deste trabalho.

Aos colegas do LMPT/UFSC, em especial ao Professor Celso, ao Anderson e a Iara, que partilharam de sua experiência para que este trabalho acontecesse.

Ao PFRH/PB 240, pelo suporte financeiro e incentivo à pesquisa, fundamental para a realização deste trabalho.

Aos membros do GSECARS do *Argonne National Laboratory* (APS, Chicago), em especial ao Professor Dr. Mark Rivers, pela oportunidade, receptividade e paciência.

Por fim, a todos aqueles com quem convivi nestes cinco anos de graduação, compartilhando experiências, frustrações, conhecimentos e momentos.

“Entre o que eu penso, o que quero dizer, o que digo e o que você ouve, o que você quer ouvir e o que você acha que entendeu, há um abismo.”
(Alejandro Jodorowsky)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo caracterizar os tipos de porosidade de rochas da Formação Serra Geral, por microtomografia de raios-X de radiação síncrotron. Para isto, foram escolhidas e analisadas nove amostras de diferentes derrames da Formação Serra Geral. Esta formação constitui grande parte da Província Magmática Paraná-Etendeka, uma das maiores províncias basálticas continentais do mundo, com áreas aflorantes nos continentes sul-americano e africano. A Formação Serra Geral é composta predominantemente por derrames basálticos (*pahoehoe* e *rubbly pahoehoe*), rochas vulcânicas ácidas e rochas intrusivas (diques e soleiras).. Neste cenário, os produtos vulcânicos podem se comportar como rochas selantes ou reservatório em sistemas petrolíferos, tendo sua função regida por suas características petrofísicas, como porosidade e permeabilidade. Desta forma, torna-se imprescindível o estudo desses ambientes para compreender o papel das rochas vulcânicas em sistemas petrolíferos não convencionais análogos, que em território brasileiro estão localizados na porção *offshore*. Observam-se basicamente três tipos de porosidade nas amostras: primária vesicular e sua variação microvesicular; secundária de dissolução de feldspato e de minerais preenchendo vesículas; e fraturas, em menor quantidade. Os resultados obtidos neste trabalho evidenciam a eficácia da técnica para o estudo qualitativo do meio poroso de rochas vulcânicas, mas que necessita aperfeiçoamentos, além da integração de outras técnicas como petrografia para se obter uma caracterização completa da rocha e de seu meio poroso. A microtomografia de raios-X se mostra como alternativa para o estudo de propriedades petrofísicas de rochas, visto que permite a reconstrução da amostra em imagens 2D e 3D, além de fornecer dados quantitativos sobre a porosidade e permeabilidade da rocha.

Palavras-chave: Rochas vulcânicas. Porosidade. Microtomografia de Raios-X.

ABSTRACT

The goal of this work is characterize the types of porosity in rocks of Serra Geral Formation, using synchrotron X ray microtomography. Then, nine samples from different magma flows of Serra Geral Formation, Parana Basin have been analyzed. This basin is part of Parana-Etendeka Magmatic Province, one of the biggest continental basaltic provinces in the world, with outcropping areas in South America and Africa. The Serra Geral Formation is constituted by acid intrusive rocks and, more expressively by basic volcanic rocks, in the form of dykes, sills and by pahoehoe and rubbly pahoehoe flows, less common by 'a'a flows. In this scenery, the volcanic products can behave as cap rocks or reservoirs in petroleum systems, with their function leaded by petrophysical characteristics, as porosity and permeability. In this way, the study of these environments is indispensable to comprehend the role of volcanic rocks in analogue non-conventional petroleum systems, located offshore in Brazil. Were observed basically three types of porosity in the samples: vesicular primary, and microvesicular variation; secondary feldspar dissolution and other filler minerals; and fractures, less common. The obtained results showed the technique efficiency for qualitative studies of volcanic rocks porous media, but with the need of improvements and the integration with other techniques, as petrography, for a whole characterization of the rock and its porous media. The X ray microtomography is an alternative for the study of petrophysical properties in rocks, since allows the sample reconstruction in 2D and 3D models, and provide quantitative data about porosity and permeability of the rock.

Key-words: Volcanic rocks. Petrophysics. X-ray microtomography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa geológico da Bacia do Paraná, com suas principais Supersequências.	26
Figura 2 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, destacando a Formação Serra Geral e sequências sedimentares anteriores e posteriores ao evento magmático.	28
Figura 3 - Classificação dos tipos de derrames básicos subaéreos baseados nas feições de superfície.	30
Figura 4 - Acumulação de hidrocarbonetos em andesitos basálticos na depressão da falha de Changling, Bacia de Songliao, China.....	33
Figura 5 - Esquema geral da migração de hidrocarbonetos, com ênfase na localização da rocha reservatório.	34
Figura 6 - Principais tipos de porosidade identificados em rochas carbonáticas. Fase poro (preto), fase não poro (branco).....	36
Figura 7 - Qualidade de reservatórios baseada em sua porosidade	37
Figura 8 - Amostras utilizadas neste trabalho, da esquerda para a direita: GUAP, S1, S2, S3, S6, BG, SR, S5 e NP1B.	46
Figura 9 - Atenuação sofrida por um feixe de raios-X ao atravessar um material.....	47
Figura 10 - Desenho esquemático do processo de aquisição tomográfica utilizando radiação síncrotron, até seu processamento de reconstrução tomográfica.	48
Figura 11 - A) Configuração de feixe de raios-X cônico e B) o efeito de <i>beam hardening</i> que é gerado pela policromaticidade dos raios emitidos na configuração cônica.....	49
Figura 12 - Emissor de raios-X utilizado para as análises deste trabalho, emite radiação síncrotron com energias variando entre 4,5 e 75 keV... 50	
Figura 13 - (A) Suporte giratório de amostra no centro da imagem, com cintilador à esquerda e uma câmera CCD logo acima. (B) Visão geral do equipamento de radiação síncrotron, ao fundo é possível observar o emissor de raios-X.....	51
Figura 14 - Broca utilizada no corte das amostras, com coroa diamantada e espaço interno de 8 milímetros. O tamanho da amostra	

varia com a resistência da rocha, mas não ultrapassando 3 centímetros (tamanho total do espaço interno da broca).	52
Figura 15 - Projeções sem filtro (esquerda) e após a passagem do filtro mediano (direita). É possível observar a perda de resolução dos cristais na imagem filtrada. No entanto, o contraste de interesse (entre região poro e não poro) é aumentado com o mesmo.	53
Figura 16 - Definição da ROI para a análise de porosidade, com a definição do tamanho da caixa (azul) nas três dimensões e seu resultado para análise (inferior à direita). Sem escala.	54
Figura 17 - Processo de binarização: à direita a imagem em tons de cinza e à esquerda apenas em preto (não poro) e branco (poro) após a segmentação binária.	55
Figura 18 - Comandos de ortho slice, median filter, extract subvolume, interactive threshold, labeling e volume rendering no software Avizo Fire 8.1, respectivamente.	57
Figura 19 - Mapa com a localização das cidades em que as amostras foram coletadas.	61
Figura 20 - Amostras dos derrames <i>pahoehoe</i> , da esquerda para a direita: GUAP, S1, S2, S3 e S6.	62
Figura 21 - Reconstrução microtomográfica bidimensional da amostra GUAP, evidenciando microfenocristais de plagioclásio próximos à vesícula no centro da amostra.	63
Figura 22 – <i>Zoom</i> da reconstrução microtomográfica bidimensional, com enfoque para a vesícula no centro da amostra e os cristais de plagioclásio tabulares, logo abaixo do poro.	64
Figura 23 - Imagem binarizada sobrepondo o ROI da reconstrução 2D nos três eixos principais (YZ, XY e XZ), com vesículas (azul) provenientes de exsolução de gases e dissolução intempérica nas três direções.	65
Figura 24 - Reconstrução 3D dos poros rotulados da amostra, com destaque para os dois grandes poros (rosa e azul) que se destacam na imagem. Topo do derrame indicado pela seta.	66
Figura 25 - Reconstrução microtomográfica 2D da amostra S1, com baixa porosidade oriunda de vesículas e evidenciando alguns processos dissolutivos.	67

Figura 26 - Imagem binarizada sobrepondo a reconstrução bidimensional, com baixa densidade de poros. No eixo YZ a porosidade é quase nula, enquanto que nos demais (XY e XZ) é incipiente. Poros em azul.	68
Figura 27 - Reconstrução do meio poroso da amostra, evidenciando a maioria dos poros oriundos de dissolução e poucos provenientes de exsolução de voláteis, uma vez que estes são mais pontuais e menos contínuos do que vesículas.	69
Figura 28 - Reconstrução microtomográfica 2D da amostra S2, com fenocristais de plagioclásio com bordas dissolvidas indicados pela seta.	70
Figura 29 – <i>Zoom</i> da reconstrução bidimensional da amostra S2, evidenciando os cristais de plagioclásio com as bordas dissolvidas (preto).	71
Figura 30 - Reconstrução bidimensional com ênfase na vesícula preenchida (tons de cinza mais escuros) e dissolução incipiente no centro da amostra (azul). Outros processos dissolutivos geradores de porosidade são observados nos fenocristais de plagioclásio.	72
Figura 31 - Reconstrução 3D do meio poroso da amostra S2, com poucos poros vesiculares, sendo a grande maioria oriunda de processos dissolutivos de cristais de plagioclásio e vesículas preenchidas.	73
Figura 32 - Reconstrução bidimensional da amostra S3 em que é possível observar poros oriundos de dissolução (pontuais), indicado pela seta e alguns maiores, que indicam processos vesiculares (microvesículas), circulado.	74
Figura 33 – <i>Zoom</i> das feições destacadas na reconstrução bidimensional da amostra S3, com a vesícula à esquerda (preto) e poros de dissolução à direita (preto).	75
Figura 34 - Imagem binarizada sobrepondo a reconstrução bidimensional da amostra nos três eixos (YZ, XY e XZ), com poros (em azul) dispersos em todos os eixos.	75
Figura 35 - Reconstrução 3D do meio poroso, confirmando as imagens bidimensionais que indicam poros dispersos, oriundos de dissolução. São observados poucos poros contínuos que resultam de processos vesiculares e quando ocorrem possuem tamanho diminuto.	76

Figura 36 - Reconstrução microtomográfica 2D da amostra S6, com grandes vesículas preenchidas (cinza escuro) e com o preenchimento parcialmente dissolvido (preto). Pela forma dos poros a dissolução ocorreu em cristais euédricos lamelares (zeolitas observadas na amostra de mão).	77
Figura 37 - Imagem binarizada sobrepondo a reconstrução bidimensional nos três eixos (YZ, XY e XZ), evidenciando a dissolução de cristais euédricos principalmente nos eixos XY. Os outros dois eixos apresentam baixa porosidade, apenas com grandes vesículas preenchidas. Poros em azul.....	79
Figura 38 - Reconstrução tridimensional do meio poroso da amostra S6, com poros angulosos e contínuos, oriundos da dissolução de cristais que preenchem as vesículas, além de poros de dissolução pontuais e dispersos na amostra.	80
Figura 39 - Amostras dos derrames <i>rubbly pahoehoe</i> , da esquerda para a direita: BG, SR e S5.....	81
Figura 40 - Reconstrução microtomográfica 2D da amostra BG, com material muito fino proveniente de remobilização devido ao brechamento, com rotação de cristais e baixa porosidade.....	82
Figura 41 - Sobreposição da imagem binarizada na reconstrução bidimensional nos três eixos da amostra (YZ, XY e XZ), com baixa porosidade e permeabilidade. Poros em azul.	83
Figura 42 - Reconstrução 3D do meio poroso da amostra BG, com poros provenientes de dissolução esparsos na imagem, com eventuais vesículas. Os poros de dissolução são maiores do que em amostras não brechadas, pois o material remobilizado é mais fino, logo, mais suscetível ao intemperismo.	84
Figura 43 - Reconstrução microtomográfica bidimensional da amostra SR, quebrada durante o processo de confecção do plugue. Possui grande quantidade de vesículas preenchidas (total e parcialmente), com porosidade formada quando não estão totalmente preenchidas.	86
Figura 44 - Binarização sobrepondo a reconstrução bidimensional nos três eixos (YZ, XY e XZ), com baixa porosidade e esta oriunda de vesículas parcialmente preenchidas. Poros em azul.....	87

Figura 45 - Imagem tridimensional no meio poroso da amostra, evidenciando os poros oriundos de processos dissolutivos (pontuais e dispersos), daqueles vesiculares (maiores e contínuos). Na parte inferior da imagem há uma vesícula parcialmente dissolvida.....	88
Figura 46 - Reconstrução microtomográfica bidimensional da amostra S5, com poucos espaços vazios aparentes e alta densidade de cristais opacos (alta densidade e reflectância).	89
Figura 47 - Imagem binarizada sobrepondo a reconstrução 2D da amostra, com poros pontuais e dispersos nos três eixos (YZ, XY e XZ) e aparente baixa porosidade.	90
Figura 48 - Sólido 3D do meio poroso da amostra, com poros poucos expressivos em volume e área, comprovando que em sua grande maioria foram formados por processos dissolutivos.	91
Figura 49 - Amostra do derrame ácido NP1B.	92
Figura 50 - Reconstrução microtomográfica bidimensional da amostra NP1B, com textura muito fina, sendo muito difícil identificar sua mineralogia. No centro da amostra há uma cavidade parcialmente preenchida, não aparentando processos dissolutivos.....	93
Figura 51 - Imagem binarizada sobrepondo a reconstrução microtomográfica nos três eixos (YZ, XY e XZ), com baixa porosidade em todos eles. Enfoque para a cavidade parcialmente preenchida, aparentando ser o único poro expressivo da amostra. Poros em azul....	94
Figura 52 - Reconstrução 3D do meio poroso da amostra, com focos de dissolução, em que o material dissolvido é mais fino do que a rocha. Além disso, há uma grande cavidade dissolvida, apresentando certa continuidade, possivelmente por não estar completamente preenchida	95

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	Bacia do Paraná	25
2.1.1	Formação Serra Geral.....	27
2.1.1.1	Derrames <i>Pahoehoe</i>	30
2.1.1.2	Derrames 'a'a.....	31
2.1.1.3	Derrames Rubbly Pahoehoe.....	31
2.2	Sistemas Petrolíferos	31
2.2.1	Rochas Reservatório.....	32
2.3	Propriedades Petrofísicas.....	34
2.3.1	Porosidade	35
2.3.1.1	Porosidade de rochas vulcânicas.....	37
2.4	Microtomografia de raios-X	41
2.4.1	Evolução.....	41
2.4.2	Aplicação na Geologia	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	Levantamento Bibliográfico	45
3.2	Amostras	45
3.3	Descrição Petrográfica.....	46
3.4	Microtomografia.....	46
3.5	Equipamentos	49
3.6	Aquisição, processamento e análise das imagens.....	51
3.6.1	Aquisição.....	51
3.6.2	Pré-processamento (filtro mediano)	53
3.6.3	Região de interesse.....	53

3.6.4	Segmentação Binária (processamento)	54
3.7	Caracterização da porosidade	55
3.7.1	Avizo Fire 8.1	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	Caracterização e localização das amostras	59
4.2	Derrames <i>Pahoehoe</i>	61
4.2.1	GUA-P	62
4.2.2	S1	67
4.2.3	S2	70
4.2.4	S3	74
4.2.5	S6	77
4.3	Derrames <i>Rubbly Pahoehoe</i>	81
4.3.1	BG.....	81
4.3.2	SR.....	85
4.3.3	S5	89
4.4	Derrame ácido (NP1B).....	92
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

1 INTRODUÇÃO

A microtomografia de raios-X por radiação síncrotron está sendo amplamente utilizada no estudo de rochas ígneas, especialmente vulcânicas, pois permite um imageamento em três dimensões da amostra sem a sua destruição. Resulta em uma sequência de fatias de imagens da amostra, que quando empilhadas reconstroem-na em três dimensões.

Embora eficaz na reconstrução 3D das amostras, a microtomografia por se basear na absorção de raios-X, quase independente da orientação cristalográfica, possui limitações para distinguir cristais que se tocam, pois não há informação sobre a orientação dos mesmos, sem identificação de onde um cristal termina e outro começa. No entanto, sua eficácia se mostra alta para a análise de parâmetros morfológicos e, conseqüentemente, para a diferenciação de tipos de derrames básicos através da morfologia de vesículas. A diferenciação pode ser feita com a imagem de uma amostra do topo e outra da base do derrame, visto que às diferentes dinâmicas e taxas de efusão, diferentes estruturas serão produzidas. Derrames do tipo *pahoehoe* possuem suas superfícies lisas, 'a'a são caracterizados por base e topo escoriáceos e *rubbly pahoehoe* por uma base vesiculada e um topo escoriáceo.

A compreensão dos processos de formação de derrames baseados em sua morfologia permite a reconstrução da arquitetura de fácies e indica as condições físicas do vulcanismo. O entendimento dos processos formadores de sistemas vulcânicos está cada vez mais estudado, tendo em vista descobertas de produtos vulcânicos vinculados a reservatórios de óleo e gás em bacias marginais, tanto em território brasileiro como em demais localidades. Estudos recentes mostram a importância de produtos vulcânicos, tanto para atingir a janela de maturação de óleo e gás, como na sua armazenagem.

Em território brasileiro, a Formação Serra Geral é a sequência vulcânica de maior expressão areal e volumétrica. Pertencente à Província Magmática Paraná-Etendeka, teve origem durante o Cretáceo Inferior em função da fragmentação do supercontinente Gondwana e abertura da porção sul do Oceano Atlântico.

Reservatórios relacionados a bacias vulcanossedimentares estão sendo estudados e têm demonstrado grande potencial para exploração de hidrocarbonetos em rochas vulcânicas e sedimentares associadas.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo caracterizar a porosidade de rochas vulcânicas pertencentes à Formação Serra Geral,

com base em nove amostras de diferentes localidades do Sul do Brasil, buscando abranger diferentes tipos de derrames que ocorrem ao longo da Formação Serra Geral e, conseqüentemente, abranger morfologias de poros distintas, para compreender melhor o meio poroso de rochas vulcânicas e contribuir para futuros estudos de reservatórios não convencionais de óleo e gás.

Caracterizações dos tipos de porosidade em rochas vulcânicas são escassas, quando comparadas com estudos abordando rochas siliciclásticas (arenitos) e carbonáticas (FERNANDES, 2009; CHOQUETTE; PRAY, 1970). Há propostas de classificação de porosidade com base em técnicas de imageamento em duas dimensões, principalmente petrografia, aplicada essencialmente em rochas de formações vulcânicas na China, sendo esta uma das únicas classificações propostas para este tipo de rocha (ZOU et al. 2013).

O estudo de sistemas vulcânicos análogos torna-se fundamental para o entendimento de reservatórios em sistemas vulcanossedimentares, tanto na distribuição espacial e geométrica dos elementos arquiteturais, como para a definição de propriedades petrofísicas, como porosidade e permeabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Localizada dentro da Placa Sul Americana, a Plataforma Sul-Americana, terreno que permaneceu estável durante a evolução dos cinturões Andino e Caribenho nas Eras Meso-Cenozoicas, abriga grande parte do território brasileiro com amplo registro geológico, compreendendo escudos cristalinos, bacias sedimentares e derrames vulcânicos, de idades variadas (SCHOBENHAUS; BRITO NEVES, 2003).

Bacias sedimentares interiores de idade paleozoica e meso-cenozóica distribuem-se ao longo de todo o território brasileiro. Estas são divididas em: Intracratônica, *Strike-slip*, Antepaís e Riftes Abortados (Aulacógenos). No cenário de bacias Intracratônicas, a Bacia do Paraná, classificada como sinéclise paleozoica, é a mais expressiva dentro da Plataforma Sul-Americana, de amplo registro estratigráfico vulcanossedimentar, com idades variando desde o Paleozóico até o Mesozóico (SILVA et al. 2003).

2.1 Bacia do Paraná

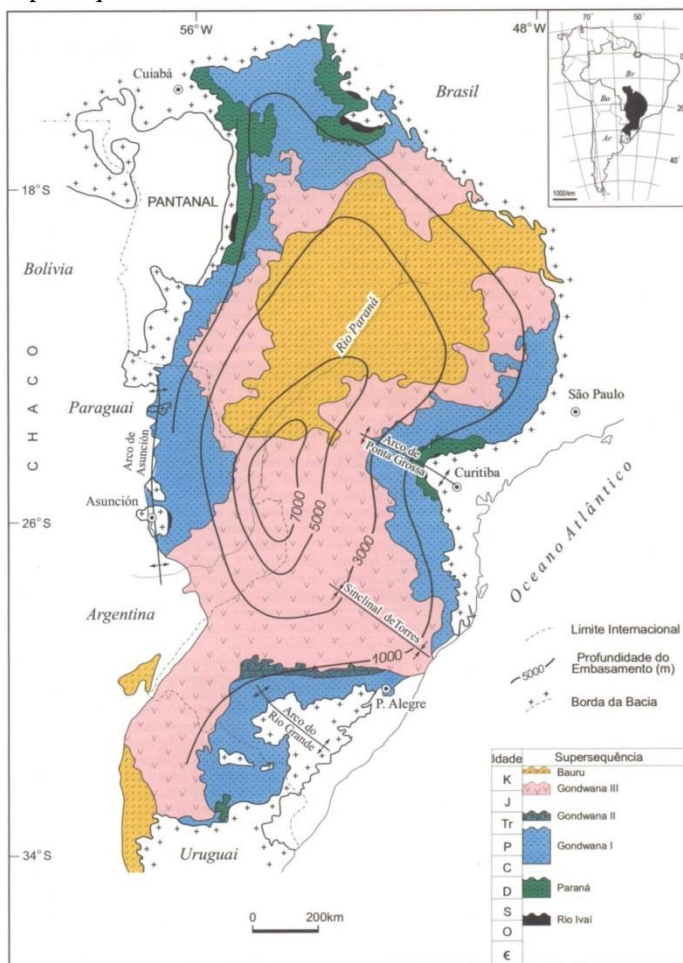
Situada na porção sudoeste da América do Sul, a Bacia do Paraná se distribui ao longo dos territórios argentino, brasileiro, uruguaio e paraguaio, com uma área superior a 1.600.000 km² (ZALÁN et al. 1990; MILANI et al. 2007). Esta apresenta um formato ovalado, com o eixo maior orientado na direção NE-SW, desenvolvida totalmente sobre a Plataforma Sul-Americana (ALMEIDA; HASUI, 1984.). Está classificada como uma bacia vulcanossedimentar intracratônica (MILANI et al. 2007).

A sequência vulcanossedimentar apresenta espessura máxima de aproximadamente sete mil metros, coincidindo geograficamente o depocentro estrutural da sinéclise com a região da calha do rio Paraná, origem de seu nome (MILANI et al., 2007). Apresenta uma evolução tectonossedimentar policíclica, que ocorre do Neo-Ordoviciano ao Neocretáceo (MILANI et al., 2007). Esta se relaciona com o período de estabilização tectônica posterior aos eventos magmáticos e metamórficos do Ciclo Brasileiro (700-450 Ma) (ALMEIDA; HASUI, 1984).

No território brasileiro, dois terços da Bacia do Paraná têm registro sedimentar amplo e variado, com rochas formadas em

ambientes continentais até ambientes marinhos, além de rochas vulcânicas basálticas (Figura 1).

Figura 1 - Mapa geológico da Bacia do Paraná, com suas principais Supersequências.



Fonte: MILANI, 2004.

O registro estratigráfico da Bacia do Paraná está delimitado em seis unidades de segunda ordem: Supersequência Rio Ivaí (Ordo-Siluriano), Supersequência Paraná (Devoniano), Supersequência

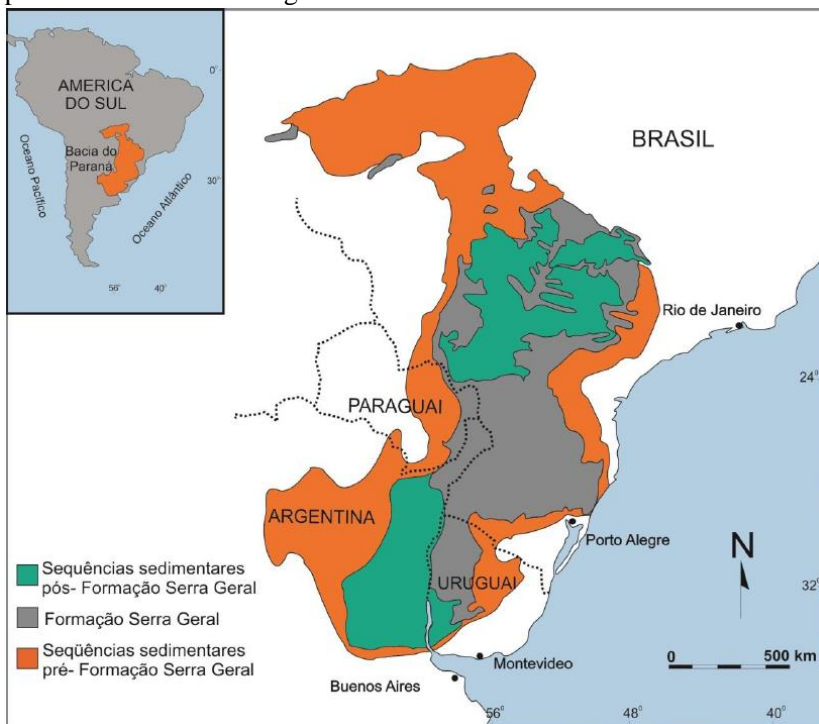
Gondwana I (Carbonífero-Triássico), Supersequência Gondwana II (Triássico), Supersequência Gondwana III (Juro-Cretáceo) e Supersequência Bauru (Cretáceo). As três primeiras supersequências são definidas por sucessões sedimentares, que definem ciclos transgressivos-regressivos relacionados ao nível do mar Paleozoico, enquanto as demais correspondem a pacotes de sedimentos continentais e rochas ígneas (MILANI, 1997; MILANI et al., 2007).

Quanto a sua origem, ainda existem divergências entre os autores em razão dos diversos episódios relacionados à sua deposição (MILANI, 2004). Um deles aponta a sedimentação cratônica pode ter se originado por um conjunto de calhas aulacogênicas no embasamento, orientadas a NW-SE (FULFARO et al., 1982 apud MILANI et al., 2007). Outra teoria sugere que as contrações térmicas pós-fenômenos tectono-magmáticos do Ciclo Brasileiro, foram fatores importantes para a implementação da sinéclise (ZALÁN et al., 1990). Por fim, outra teoria indica que, a origem da Bacia está associada com a flexura litosférica por sobrecarga tectônica em eventos orogenéticos, mecanismo importante durante a evolução bacinal (MILANI; RAMOS, 1998).

2.1.1 Formação Serra Geral

A Supersequência Gondwana III (porção superior da Bacia do Paraná), de idade Juro-Cretácea, abriga a Província Magmática Paraná-Etendeka (PPE), uma província basáltica continental (PBC) com maior registro volumétrico de extravasamento intracontinentais de lavas da Terra (ALMEIDA; CARNEIRO; BARTORELLI, 2012). Estendendo-se por uma área de cerca $1,3 \times 10^6$ quilômetros quadrados, a PPE está localizada nos continentes africano e sul-americano, abrangendo parte do Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai na América do Sul (Figura 2).

Figura 2 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, destacando a Formação Serra Geral e sequências sedimentares anteriores e posteriores ao evento magmático.



Fonte: Modificado de Waichel et al., 2013

Sua origem está associada ao Cretáceo Inferior durante a fragmentação do supercontinente Gondwana e abertura do Oceano Atlântico Sul (MARQUES; ERNESTO, 2004; MILANI, 2004; FRANK; GOMES; FORMOSO, 2009). Frank, Gomes e Formoso (2009) consideram que o volume total do magmatismo na PPE foi de 1.700.000 quilômetros cúbicos. No entanto, a Província não está distribuída uniformemente nos dois continentes, com 90% do volume total concentrado em território sul-americano. Em território brasileiro, esta sequência foi primeiramente chamada de Eruptivas Serra Geral por White (1908) e posteriormente de Formação Serra Geral (FSG) por Gordon (1947).

Os derrames da Formação Serra Geral chegam a atingir espessura máxima de 1.700 metros (ALMEIDA, 1986), dispõe-se sobre os

arenitos eólicos da Formação Botucatu ou diretamente sobre as rochas do embasamento pré-cambriano (ALMEIDA; CARNEIRO; BARTORELLI, 2012) e são compostos majoritariamente por rochas básicas (97,5%) comparado com as ácidas (2,5%). Estes basaltos foram divididos por Bellieni et al. (1984) e Mantovani et al. (1985) em dois grandes grupos baseados no seu conteúdo de óxido de titânio: basaltos com alto titânio (TiO_2 maior do que 2%) e basaltos com baixo titânio (TiO_2 menor do que 2% e baixos valores de Be, La, Ce, Zr, Y).

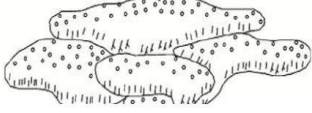
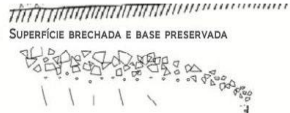
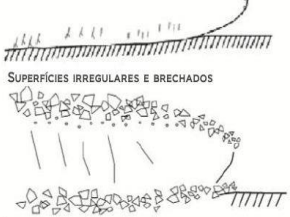
Além dos derrames basálticos, a Formação Serra Geral engloba soleiras de diabásio e três grupos principais de enxames de diques, representados pelo Arco de Ponta Grossa (PR), da Serra do Mar (SP) e de Florianópolis (SC), distribuídos radialmente (ALMEIDA; CARNEIRO; BARTORELLI, 2012). O enxame da Serra do Mar, de direção preferencial NE, localiza-se entre os Estados de São Paulo e Rio de Janeiro. O enxame do Arco de Ponta Grossa corta o embasamento cristalino, as rochas sedimentares e as próprias efusivas, na direção NW, enquanto o de Florianópolis, de direção NNE, corta preferencialmente granitos neoproterozóicos (ZALÁN, 2004; TOMBA, 2012).

Ainda existem divergências entre os autores a respeito da duração do evento magmático que gerou da PPE, levando a discussões sobre sua idade. Stewart et al. (1996) e Turner et al. (1994), segundo datações $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, estimam que o evento foi de 138-127 Ma, com duração entre 10 e 12 Ma. Mincato (2000) estimou em 3,5 Ma a duração total do evento, entre 133,9-130,3 Ma, com ápice em 132 Ma. Dados mais recentes de Thiede e Vasconcelos (2010) apontam que, a extrusão magmática ocorreu em um curto intervalo, menor do que 1,2 Ma, há aproximadamente 134 Ma.

As rochas da Formação Serra Geral são de composição toleítica, representadas por basaltos e andesibasaltos toleíticos com augita e pigeonita, sendo aproximadamente 90% do volume total do magmatismo composto por essas rochas vulcânicas. De maneira subordinada, ocorrem andesitos toleíticos, riodacitos e riolitos, correspondentes a pulsos magmáticos tardios (NARDY; MACHADO; OLIVEIRA, 2008).

A Formação Serra Geral apresenta derrames, cujas estruturas decorrem do fluxo diferenciais de lava e resfriamento entre topo, base e meio do derrame, com geração de fraturas (Figura 3) (ALMEIDA, CARNEIRO e BARTORELLI, 2012).

Figura 3 - Classificação dos tipos de derrames básicos subaéreos baseados nas feições de superfície.

TIPO DE LAVA	DEFINIÇÃO	CROQUI	IMPORTÂNCIA
PAHOEHOE	UM TERMO HAWAIIANO QUE SIGNIFICA 'LAVA BÁSICA LISA E INQUEBRÁVEL' QUE TEM SUPERFÍCIE LISA, REVOLTA, ONDULADA OU CORDADA. LAVAS DESSE TIPO SÃO COMPOSTAS POR VÁRIAS UNIDADES	MÚLTIPLAS UNIDADES (COMPOSTO) CONSTITUINTES DO PAHOEHOE 	AS CARACTERÍSTICAS DESSAS SUPERFÍCIES SE DÃO PELO MOVIMENTO DA LAVA FLUIDA SOB UMA CROSTA SUPERFICIAL SOLIDIFICADA. TIPO DE LAVA COMPOSTO.
RUBBLY PAHOEHOE	FLUXOS DE LAVA COM BASE PRESERVADA E CROSTA SUPERIOR BRECHADA, CONSTITUINDO TIPOS MORFOLÓGICOS DIFERENTES DOS TÍPICOS PAHOEHOE E A'A	SUPERFÍCIE BRECHADA E BASE PRESERVADA 	TIPO DE LAVA TRANSICIONAL ENTRE PAHOEHOE E A'A, QUE SE FORMA SOB TAXAS EFUSIVAS DE LAVAS MAIORES QUE A PAHOEHOE
A'A	TERMO HAWAIIANO QUE SIGNIFICA 'PEDRA COM LAVA ASPERA'. É UM DOS TRÊS TIPOS DE FLUXOS DE LAVA BÁSICA, QUE A SUPERFÍCIE É COMPOSTO POR BLOCOS DE LAVA QUEBRADOS	SUPERFÍCIES IRREGULARES E BRECHADOS 	GERALMENTE DERRAMES A'A SÃO OS MAIS VISCOSOS DE TODOS OS TIPOS MORFOLÓGICOS E AVANÇAM MUITO MAIS DEVAGAR DO QUE FLUXOS PAHOEHOE NA MESMA DECLIVIDADE.

Fonte: Modificado de Duraiswami et al., 2014.

2.1.1.1 Derrames *Pahoehoe*

São identificados por apresentarem uma superfície lisa, ondulados (estrutura em corda) e pela formação de tubos de lava (MACDONALD, 1953; WENTWORTH; MACDONALD, 1953). Derrames *pahoehoe* desenvolvem-se, primeiramente, por um avanço da lava na forma de lóbulos, em que a porção superior é resfriada mais rápida. Em um segundo momento, pode haver ou não a inflação destes lóbulos.

Derrames deste tipo são caracterizados pela formação de três zonações horizontais: basal, centro e topo (AUBELE; CRUMPLER; ELSTON, 1988). A porção basal se apresenta vesiculada, com espessura de 30 a 40 cm; o centro do derrame se mostra denso, não vesiculado, tem granulação média, eventualmente com estruturas acamadadas, que geralmente possuem pouca ou nenhuma vesícula (microvesículas); e um topo vesiculado, com aproximadamente metade da espessura total do fluxo, em que se concentram a maior densidade vesicular do derrame.

Waichel, Lima e Sommer (2006), descrevem *pahoehoes* simples (apenas um lóbulo) e compostos (mais de um lóbulo) para a Formação

Serra Geral. Estes derrames descritos apresentam as características típicas esperadas para um fluxo inflado, com formação da zonação interna, formação de fraturas na zona superior e lóbulos pouco espessos na porção frontal.

2.1.1.2 Derrames 'a'a

Derrames deste tipo são caracterizados por apresentarem topo e base fragmentados e um núcleo maciço (MACDONALD, 1953; WENTWORTH; MACDONALD, 1958). O processo de formação do derrame ocorre de maneira similar a uma esteira rolante, com o resfriamento da lava em blocos na porção superior, jogadas para a sua base à medida que o fluxo avança. Geralmente sua ocorrência é pouco comum em Províncias Basálticas Continentais.

Waichel, Lima e Sommer (2006) descrevem derrames deste tipo para a Formação Serra Geral no Estado do Paraná. Estes têm espessura de até um metro e geralmente estão incompletos, com topo escoriáceo e núcleo maciço preservado, com a base (também escoriácea) geralmente ausente.

2.1.1.3 Derrames Rubbly Pahoehoe

São tipos de derrames transicionais, entre *pahoehoe* e 'a'a, com uma base vesiculada, núcleo maciço e topo brechado (DURAI SWAMI; BONDRE; MANAGAVE, 2008). Derrames deste tipo possuem quatro partes quanto a sua estruturação interna: crosta inferior vesiculada, núcleo maciço, crosta superior vesiculada e topo brechado (KESZTHELYI, 2002; GUILBAULD, 2003).

Segundo Barreto et al. (2014) e Rossetti et al. (2014), há presença deste tipo de derrame na porção sul da Sinclinal de Torres (RS), com geometria tabular e espessuras variando entre 40 e 50 metros.

2.2 Sistemas Petrolíferos

Estudos mais recentes (CHEN; HUO; ZHANG, 1999; FENG, 2008) em algumas bacias sedimentares, principalmente na China, mostram a importância de derrames vulcânicos dentro de sistemas petrolíferos, tanto influenciando no grau de maturação de matéria orgânica, como no armazenamento de hidrocarbonetos.

Sistema petrolífero é um conjunto de elementos, que agrupados controlam a formação e acumulação de hidrocarbonetos em bacias

sedimentares. Quando ativo compreende quatro elementos: Rochas geradoras maduras, rochas-reservatório, rochas selantes e trapas; além de dois fenômenos geológicos temporais: migração e sincronismo (MILANI et al., 2001).

Dentro desse sistema, rochas geradoras são aquelas que, em algum tempo do período geológico, tiveram volumes de matéria orgânica de qualidade acumulados. Foram submetidas a gradientes de temperatura e pressão específicas, gerando hidrocarbonetos em subsuperfície. Essas rochas são normalmente provenientes de ambientes de baixa energia (granulometria fina) e que tiveram “explosões de vida” microscópica (MILANI et al., 2001).

Uma vez gerado, o petróleo passa a ocupar mais espaço do que sua matéria orgânica geradora, tornando a rocha supersaturada em hidrocarbonetos que aumentam a pressão e geram fraturamentos na mesma, fazendo com que haja migração para as zonas de mais baixa pressão. A migração ocorre até que o hidrocarboneto encontre uma rocha com espaço poroso que permita seu armazenamento (MILANI et al., 2001).

Normalmente são litologias com granulometria de fração areia a seixo, representando paleoambientes de média/alta energia acumulada. Estas rochas normalmente são arenitos, calcarenitos e conglomerados diversos, no entanto, qualquer rocha que contenha espaço poroso pode atuar como reservatório (MILANI et al., 2001).

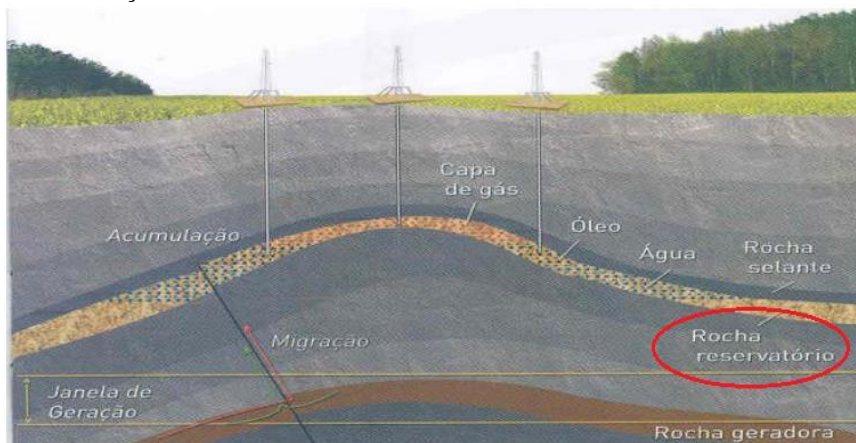
No entanto, para ficar armazenado de maneira efetiva no espaço poroso de uma rocha, esta precisa estar aprisionada para que a migração do mesmo não continue para as zonas de mais baixa pressão. Essas armadilhas de hidrocarbonetos podem ser estruturais, sedimentares, domos salinos, entre outros (MILANI et al., 2001).

Uma vez atraídos para o interior de uma trapa, os hidrocarbonetos precisam encontrar uma camada impermeabilizante que impeça seu escape. Essas rochas (selantes) normalmente têm baixa permeabilidade, com baixa transmissão de fluido, ficando assim acumulada nos poros da rocha reservatório (MILANI et al., 2001).

2.2.1 Rochas Reservatório

Estudos associados às rochas reservatório normalmente estão ligados a rochas sedimentares, principalmente arenitos e carbonatos. No entanto, estudos recentes mostram a importância de produtos vulcânicos, tanto para atingir a janela de maturação de óleo e gás, como

Figura 5 - Esquema geral da migração de hidrocarbonetos, com ênfase na localização da rocha reservatório.



Fonte: Modificado de Thomas, 2001 apud Marques, 2011.

A natureza da rocha reservatório determina a quantidade de fluidos armazenados entre seus espaços vazios, a habilidade do fluido em percolar por ela e outras propriedades físicas associadas.

Aumentar o grau de conhecimento das propriedades de um reservatório é imprescindível para seu estudo. Propriedades como permeabilidade e porosidade (além de outras propriedades petrofísicas), permitem prever o comportamento dos fluidos e podem levar a uma melhor gestão do campo petrolífero, aumentando a confiança quanto ao número de poços a serem instalados. Um bom conhecimento da rocha reservatório a ser explorada permite com que gastos desnecessários sejam evitados, pois normalmente o grau de incerteza (ou nível de desconhecimento) de um reservatório está associado ao risco e probabilidade de perda inerente à exploração. Desta forma, o estudo de reservatórios, associado com ferramentas disponíveis, objetiva a melhor tomada de decisão no menor tempo possível. (MARQUES,2011).

2.3 Propriedades Petrofísicas

Archie (1950) propôs a introdução do termo petrofísica, para agrupar todos os estudos de propriedades físicas das rochas relacionadas à distribuição de fluidos em seu espaço poroso. Hoje é definido como

petrofísica, o conjunto de estudos e disciplinas que dizem respeito às propriedades físicas de rochas e minerais, seja na matriz ou preenchendo poros, além dos fluidos que percolam no meio poroso.

Propriedades petrofísicas importantes em uma rocha reservatório incluem: porosidade, permeabilidade, textura, resistividade da rocha e do seu fluido à corrente elétrica, conteúdo de água como função da pressão capilar e a natureza tortuosa dos interstícios ou canais de poro. No entanto, segundo Tiab e Donaldson (2012), as duas propriedades petrofísicas mais importantes para o estudo de rochas reservatório são porosidade e permeabilidade. A medição do espaço vazio de uma rocha é chamada de porosidade e, a medida da capacidade da rocha transmitir fluidos, de permeabilidade. Conhecer estas duas propriedades torna-se essencial antes de responder qualquer pergunta sobre o fluido na rocha.

2.3.1 Porosidade

Porosidade (ϕ), ou porosidade volumétrica, é uma propriedade macroscópica do meio poroso definida pela razão da quantidade de poros em uma substância sobre todo seu meio poroso. Neste caso definiremos como sendo a razão do volume de espaços vazios (V_p), sobre o volume total (V_t) do meio poroso, como mostra a equação 1:

$$\phi = V_p / V_t \quad (1)$$

Os poros de um material podem estar ou não conectados, no entanto, para a percolação de fluidos através do meio poroso, apenas os poros interconectados interessam. Esta é chamada de *porosidade efetiva* (ϕ_e).

Quanto à formação em rochas, estes poros podem se originar durante a formação da rocha ou em processos geológicos secundários diagenéticos e intempéricos, como dissolução e substituição de minerais primários além de processos estruturais, como a geração de fraturamentos na rocha (CHOQUETTE; PRAY, 1970; ZOU et al. 2013)

Mesmo que a maioria dos reservatórios petrolíferos e aquíferos seja formada por rochas sedimentares, outros tipos de rochas possuem capacidade de se comportar como armazenadores de fluidos, normalmente obtendo porosidade por processos de fraturação. Sistemas porosos em rochas carbonáticas são geralmente complexos quanto a sua geometria e gênese, isto porque o local e o tempo em que esta porosidade é gerada são aspectos importantes para sua classificação

superiores a 35% são raros quando se trata de rochas reservatório (Figura 7).

Figura 7 - Qualidade de reservatórios baseada em sua porosidade

Variação de porosidade	Classificação
0-5%	Insignificante
5-10%	Pobre
10-15%	Razoável
15-20%	Bom
>20%	Muito bom

Fonte: Becker, 2014; modificado de Tiab e Donaldson, 2012.

2.3.1.1 Porosidade de rochas vulcânicas

A estrutura de um reservatório vulcânico é controlada pelas propriedades do magma e mudanças em processos de cristalização e condições físico-químicas, o que gera processos de exsolução, fraturamentos e cavidades, que irão compor o meio poroso da rocha (ZOU et al., 2013).

Da mesma forma como observado em rochas sedimentares, a porosidade nas vulcânicas pode ser tanto primária como secundária (Tabela 1). Estes dois tipos de porosidade ainda possuem subdivisões quanto ao seu processo formador e morfologia (ZOU et al., 2013). No entanto, existe uma terceira subdivisão, exclusiva para todos os poros gerados por processos de fraturamento.

Tabela 1 - Processos primários e secundários de reservatórios vulcânicos, com seus respectivos poros produzidos.

TIPOS DE POROSIDADE EM ROCHAS VULCÂNICAS

GÊNESE	PROCESSO	TIPO DE PORO
PRIMÁRIO	"BRECHAMENTO"	ESPAÇO VAZIO DE FRAGMENTOS VÍTREOS E PÚMICES
	DISSOLUÇÃO DE CRISTAIS APÓS O ESTÁGIO MAGMÁTICO	POROS MÓLDICOS E CRIBIFORMES INTRA-CRISTALINOS
	ESCAPE DE GASES	VESÍCULAS E CONDUTOS DE GASES
	CATACLASE CATACLASE DE FLUÍDO	FRATURAS INTERCALADAS OU FRATURAS TENSIONAIS
	BRECHAMENTO AUTOCLÁSTICO	POROS INTRAGRANULARES
SECUNDÁRIO	CATACLASE DE FENOCRISTAIS	POROS DE CATACLASE CRISTALINA
	ALTERAÇÃO DISSOLUÇÃO E PRECIPITAÇÃO DE MINERAIS SECUNDÁRIOS	POROS ESPONGIFORMES À GRUTAS
	PRECIPITAÇÃO DE MINERAIS SECUNDÁRIOS EM POROS	DRUSA
	MIGRAÇÃO DE MINERAIS SECUNDÁRIOS	POROS MÓLDICOS E CRIBIFORMES SECUNDÁRIOS
	FRATURA TECTONISMO	FRATURAS ESTRUTURAIS
	RESFRIAMENTO BRUSCO	FRATURAS DE RESFRIAMENTO
	"BRECHAMENTO" DE RESFRIAMENTO LENTO	POROS DE DRUSAS BRECHADAS

Fonte: Modificado de Zou et al., 2013.

Apesar dos tipos de porosidade apresentados na Tabela 1, Zou et al. (2013) propõem diferentes classificações para os processos formadores e respectivos poros formados em rochas vulcânicas.

Geralmente os tipos de porosidade não ocorrem de maneira isolada, havendo interação entre os tipos de poros com a combinação de processos formadores, que podem levar tanto ao aumento como à diminuição da porosidade total da rocha.

Em rochas vulcânicas, a porosidade primária refere-se a todos os poros formados durante a intrusão, erupção, resfriamento e cristalização do magma, sendo anterior a diagênese e preservada até este momento. Segundo Feng (2008) e Wang et al. (2003a, b, c) *apud* ZOU et al. (2013), a porosidade ainda pode ser subdividida em vesículas primárias, poros intergranulares e interbrecha vulcânica e poros inter e intracristalinos.

Erupções vulcânicas produzem vários tipos de clastos vesiculados, que mostram claramente processos de exsolução de gases no magma em razão do rápido resfriamento e diminuição da pressão ao atingir a superfície, sendo as vesículas componentes importantes para um bom reservatório. Os voláteis presentes na lava ascendem e se acumulam, formando inúmeras vesículas, principalmente no topo do fluxo. Vesículas são eventualmente preenchidas por minerais, formando amígdalas. No caso destas não serem completamente preenchidas, formam-se poros residuais (TORAMARU, 1990).

Eventualmente, vesículas preenchidas por minerais podem se tornar poros, isto ocorre através de processos de dissolução por fluidos tardios, gerando porosidades irregulares, de variados tamanhos e distribuição irregular, recebendo o nome de porosidade intramigdalóide (TORAMARU, 1990).

Em rochas vulcanoclásticas, os poros intergranulares são os mais comuns, principalmente em brechas vulcânicas. Já os poros interbrechas se desenvolvem em fácies de brecha e ocorrem amplamente em fácies vulcânicas explosivas (ZOU et al., 2013).

Ainda há formação de porosidade durante a cristalização dos minerais da rocha, comumente dentro de feno e megacristais, mas principalmente dentro de matrizes com micrólitos, são chamadas de porosidade inter e intracristalinas. O grau de desenvolvimento deste tipo de porosidade é diretamente proporcional ao grau de cristalização. Costumam aparecer em pequenas escalas e são de extrema importância para conectar o espaço poroso (ZOU et al., 2013).

Como anteriormente citado, há também a formação de porosidade secundária em rochas vulcânicas e refere-se aos poros e cavidades formados por dissolução e/ou transporte de minerais, partículas cristalinas e/ou poros primários através de fluidos hidrotermais, dissolução ou intemperismo (ZOU et al., 2013).

Quando o processo formador é relacionado com dissolução, o mineral dissolvido dará nome ao tipo de porosidade como a dissolução de feldspatos e carbonatos. O primeiro inclui microporos formados por dissolução de feldspatos, seja como fenocristal, matriz, micrólitos ou fragmentos cristalinos. Feldspatos são dissolvidos em meio ácido, formando poros irregulares, preferencialmente ao longo dos planos de clivagem, preservando a forma do cristal. Para a formação destes microporos precisa haver uma estrutura porosa, como vesículas e fissuras na rocha para a percolação de fluidos que promoverão a dissolução dos cristais de feldspato (ZOU et al., 2013).

Da mesma forma, a dissolução de carbonatos pode ser um fator importante para aumentar a capacidade do reservatório, sendo que minerais como calcita e siderita ocorrem cedo, preenchendo poros e suprimindo a porosidade da rocha. Estes minerais se formam sob condições alcalinas e são dissolvidos em ambientes ácidos, sendo necessária a consolidação de um espaço poroso prévio em que fluidos ácidos irão percolar, para promover a dissolução. Os cátions, produtos da dissolução na água, podem tornar o fluido ainda mais ácido, aumentando a porosidade (ZOU et al., 2013).

Além de poros primários e secundários, um terceiro grupo foi criado para identificar a porosidade em rochas vulcânicas, o grupo de fraturas, visto que essas podem se formar tanto em processos primários como secundários. Fraturas ocorrem em rochas quando estas são submetidas ao estresse tectônico, durante o resfriamento da rocha ou até mesmo por processos intempéricos. Estágio mais recente no processo de fraturamento pode gerar fraturas que serão preenchidas. Fraturas mais tardias podem ocorrer vertical e horizontalmente e sem preenchimentos. São de extrema importância, pois interconectam o espaço poroso da rocha e, consequentemente, aumentam sua capacidade de reservatório (ZOU et al., 2013).

Durante o resfriamento ou condensação do magma existe a produção de um estresse resultante da perda de calor ou da contração de arrefecimento, que pode levar à quebra da matriz rochosa e formar fraturas de contração, também chamadas de juntas de contração. Durante o desenvolvimento destas juntas, a rocha vulcânica se torna

"laminada" e a espessura destas está relacionada com o grau de desenvolvimento das fraturas. Em termos de atitude, estas são classificadas em verticais e horizontais. As verticais na realidade são subverticais, com ângulos próximos a 80 graus e dispondo-se de forma subparalela e com grandes extensões ao longo da rocha. Já as horizontais são sub-horizontais, pouca continuidade e pequena profundidade (ZOU et al., 2013).

Outro tipo de fratura é formado quando a rocha já está consolidada e é submetida ao estresse, com uma série de fraturas geralmente cortando vesículas e poros de dissolução. Logo, conecta o espaço poroso e incrementa as propriedades físicas de reservatórios vulcânicos. Geralmente ocorrem em grupos ou famílias, com longas extensões, profundidades e ampla distribuição na rocha (ZOU et al., 2013).

Um terceiro tipo de fratura se forma quando agentes intempéricos atuam sobre a rocha, não apresentando direcionalidade ao longo da rocha e gradualmente diminuem à medida que aumenta a profundidade. Geralmente estão conectadas com os demais tipos de poros que ocorrem em rochas vulcânicas, mas costumam apresentar preenchimentos, normalmente de ferro, com baixa capacidade de reservatório. No entanto, elas apresentam estruturação para uma posterior dissolução hidrotermal, o que promoveria o aumento da porosidade e permeabilidade da rocha (ZOU et al., 2013).

Apesar da classificação dos tipos de porosidade ser extensa, ela foi baseada apenas na descrição de lâminas delgadas por petrografia, sem a utilização de outras técnicas, como microtomografia de raios-X.

A microtomografia começou a ser aplicada em rochas vulcânicas apenas em 2001 por Song et al., para determinar estruturas microgeométricas e propriedades físicas de vesículas, mostrando-se eficaz para determinação de parâmetros morfológicos. Trabalhos mais recentes buscam a quantificação da porosidade e permeabilidade em rochas vulcânicas por meio da microtomografia de raios-X (BECKER, 2014). Contudo, ainda são necessários mais estudos na área.

2.4 Microtomografia de raios-X

2.4.1 Evolução

A microtomografia de raios-X (micro CT) teve suas origens na tomografia axial computadorizada (CAT ou CT), usada para

escaneamentos na área da medicina desde a década de 70. A CAT era usada para gerar imagens em duas dimensões da estrutura interna de um objeto, como ossos quebrados, cáries dentárias, que podiam ser facilmente reconhecidas pela variação de absorção dos raios-X. A principal limitação da CAT está relacionada com a geração da imagem em 2D, fazendo com que problemas fora do plano da imagem, como a posição de um tumor, por exemplo, não seja identificado. (LANDIS; KEANE, 2010).

Esta limitação é resolvida utilizando a CAT combinada a uma série de imagens 2D de absorção de raios-X, gravadas à medida que o objeto rotaciona em um único eixo. Utilizando princípios matemáticos da tomografia, essa série de imagens pode ser reconstruída para gerar uma imagem digital em três dimensões. (LANDIS; KEANE, 2010). Como os mapas de reconstrução 3D da estrutura interna de materiais aplicados à área médica se mostraram altamente eficientes, não demorou muito para a técnica ser utilizada em outras áreas, como ciência dos materiais e, mais recentemente, aplicada para o estudo de rochas (BAKER et al., 2012; VIEIRA; WAICHEL; MOURO, 2014; BECKER, 2014).

A evolução da técnica permite que as resoluções utilizadas atinjam valores micrométricos. Possibilita uma caracterização estrutural mais detalhada dos materiais, sendo chamada de microtomografia de raios-X.

2.4.2 Aplicação na Geologia

Apesar de inicialmente a técnica de microtomografia de raios-X ser basicamente utilizada na área médica, logo apresentou outras aplicações em virtude do seu alto potencial. Em 1974, foi utilizada pela primeira vez em pesquisa paleontológica (FOURIE, 1974 apud CNUDE et al., 2006). Diversos autores aplicaram a técnica em pesquisas de solo (PETROVIC et al., 1982 apud CNUDE et al., 2006) e começou a ser utilizada para análise de materiais valiosos, como meteoritos (ARNOLD et al., 1982 apud CNUDE et al., 2006) por não destruir a amostra.

A partir de então, a microtomografia de raios-X foi aplicada de maneira mais específica, como a caracterização 3D de sistemas porosos e tamanho de grão em rochas sedimentares, reservatórios ou não (KNACKSTEDT et al., 2006; FERNANDES et al., 2012; APPOLONI; FERNANDES; RODRIGUES, 2007; FERNANDES, 2009;

MANTOVANI, 2013; MACHADO, 2016; PALOMBO et al., 2015), em rochas vulcânicas (BAI; BAKER; RIVERS, 2008; BAKER et al., 2012; POLACCI, 2008; POLACCI et al., 2009, 2012; SONG, 2001; BECKER, 2014; VIEIRA; WAICHEL; MOURO, 2014), análises deformacionais, fraturas e processos estruturais (FORSBERG, 2008; KALAM et al., 2011 apud CNUDDÉ; BOONE, 2013), análise de minerais de minério (GHORBANI et al., 2011 apud CNUDDÉ; BOONE, 2013) e caracterização morfológica de fósseis (GAI et al., 2011 apud CNUDDÉ; BOONE, 2013).

Ainda em rochas vulcânicas, a microtomografia de raios-X possibilita a identificação de características físicas e morfológicas de vesículas, como tamanho, distribuição espacial, interconectividade e orientação preferencial (SONG et al., 2001); processos de exsolução, vesiculação e cristalização (BAKER et al., 2012); medição da distribuição do tamanho de cristais e vesículas (BAKER et al., 2012; BAI; BAKER; RIVERS, 2008; POLACCI et al., 2008, 2009, 2012). Nestes estudos a radiação síncrotron está sendo mais utilizada do que a microtomografia de feixe cônico, pois além de proporcionar um menor período de tempo em cada análise, fornece uma melhor resolução da amostra e não produz distorção das imagens geradas, visto que seu feixe de raios-X emitido é retilíneo (FLANNERY et al., 1987).

A microtomografia de raios-X apresenta bons resultados quando aplicada na área da geologia. No entanto, se aplicada a outras técnicas, pode apresentar resultados ainda mais satisfatórios (REIS NETO et al., 2011; LOPES et al., 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta sessão é dedicada à explicação dos materiais e procedimentos utilizados durante a elaboração deste trabalho. Esta abrange desde levantamento bibliográfico até a interpretação de imagens de rochas vulcânicas obtidas por microtomografia de raios-X.

3.1 Levantamento Bibliográfico

Esta etapa se estendeu ao longo de toda a execução do trabalho, com consultas realizadas visando trabalhos sobre rochas e litofácies vulcânicas, sobre os tipos de porosidades existentes nestas rochas, e, principalmente, sobre a aplicação da técnica de microtomografia de raios-X para seu estudo. Sua aplicação nestas rochas é recente, quando comparado a demais rochas e materiais.

A principal bibliografia usada para a classificação da porosidade das rochas vulcânicas foi a de ZOU et al. (2013). Enquanto para a aplicação da microtomografia de raios-X foram os trabalhos de BAI; BAKER; RIVERS (2008) e BAKER et al. (2012).

3.2 Amostras

A fim de caracterizar a porosidade das rochas vulcânicas basálticas da Formação Serra Geral foram selecionadas nove amostras. Com exceção de uma coletada no Estado de Santa Catarina, na cidade de Anita Garibaldi, todas as amostras são do acervo do Laboratório de Laminação (LabLam) da Universidade Federal de Santa Catarina e de outros projetos de pesquisas de laboratórios e pesquisadores parceiros.

O critério de seleção para as amostras foram suas feições macroscópicas e ocorrência, com intuito de abranger diferentes morfologias de derrame e área de ocorrência (Figura 8). Para isto, foram selecionadas amostras dos três estados do sul do Brasil, com duas de Santa Catarina, uma do Paraná e seis do Rio Grande do Sul.

Figura 8 - Amostras utilizadas neste trabalho, da esquerda para a direita: GUAP, S1, S2, S3, S6, BG, SR, S5 e NP1B.



Fonte: Do Autor, 2016.

As amostras utilizadas são de derrames tipo pahoe-hoe, rubbly pahoe-hoe e uma vulcânica ácida, abrangendo os diferentes litotipos da FSG e as variações internas dos derrames, como base, meio e topo.

3.3 Descrição Petrográfica

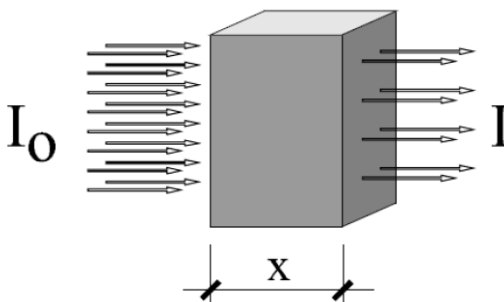
Apesar da análise petrográfica ser uma ferramenta de extrema importância na identificação de minerais, aspectos texturais, classificação modal e até mesmo na descrição e caracterização dos tipos de poros em rochas vulcânicas, esta não foi utilizada neste trabalho, com intuito de analisar a capacidade de sustentação da microtomografia de raios-X para este tipo de análise.

3.4 Microtomografia

O princípio da tomografia de raios-X é a aquisição de imagens pela medida da radiação atenuada gerada pelos diferentes materiais que compõe a amostra (FERNANDES et al., 2012). Ou seja, esta tem o objetivo de realizar um mapeamento do coeficiente de atenuação linear, por meio da atenuação do feixe de fótons emitidos. O coeficiente de atenuação linear é uma propriedade intrínseca a cada material, definindo a taxa de absorção da radiação pela amostra (MANTOVANI, 2013), pois o material possui diferentes taxas de absorção de radiação eletromagnética. O processo de atenuação pode ser observado na Figura

9, onde o feixe de raios-X com intensidade inicial I_0 , ao atravessar o objeto sofre espalhamento e absorção, fazendo com que só parte da radiação seja transmitida pelo objeto com intensidade I (Silva, 2009).

Figura 9 - Atenuação sofrida por um feixe de raios-X ao atravessar um material.

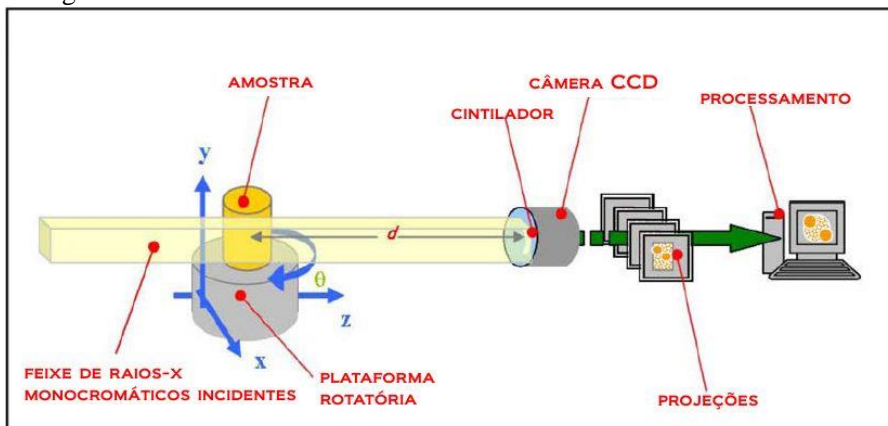


Fonte: Silva, 2009.

Microtomógrafos convencionais utilizam tubos de raios-X com feixe cônico como fontes de radiação, de modo que a amostra deva ficar a uma distância suficientemente longe a fim do feixe abranger toda a região da amostra a ser analisada. Os raios-X sofrem atenuação pela amostra, enquanto esta rotaciona por uma base, e atingem um cintilador, localizado atrás da mesma, transformando os fótons de raios-X em luz visível. Os fótons transformados são capturados por um detector (câmera CCD), gerando uma série de imagens em duas dimensões da amostra (Figura 10).

Após a aquisição das projeções, estas passam pelo processamento via algoritmo matemático de reconstrução, que geram as seções 2D (*slices*) da amostra (Figura 10). Para reconstruir o material em três dimensões, é realizado um processo de renderização, que converte os *slices* em um empilhamento ordenado (MANTOVANI, 2013).

Figura 10 - Desenho esquemático do processo de aquisição tomográfica utilizando radiação síncrotron, até seu processamento de reconstrução tomográfica.



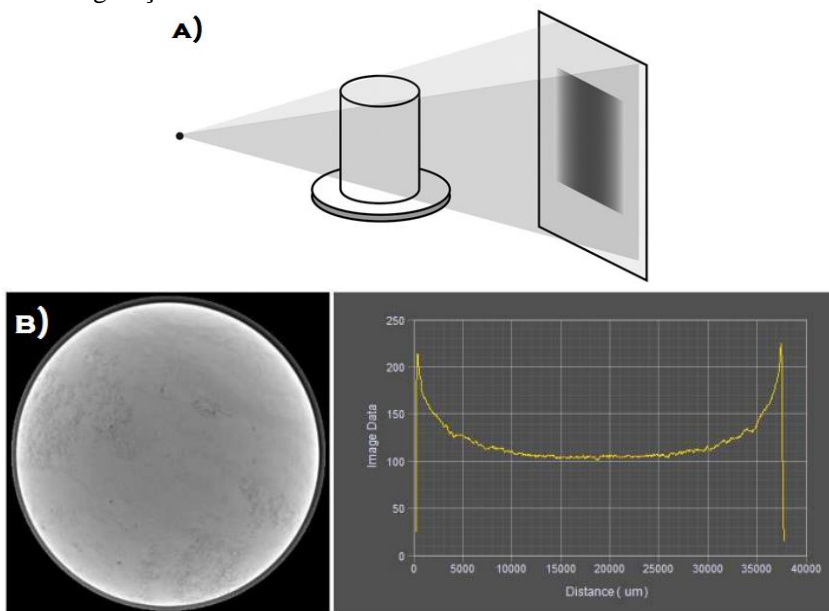
Fonte: Modificado de Polacci et al., 2009.

O desenvolvimento do imageamento tomográfico utilizando radiação síncrotron como fonte de raios-X foi um advento importante para a técnica, visto que a radiação resulta de um feixe de elétrons de alta energia gerado por campos magnéticos. A luz emitida por radiação síncrotron é em muitas ordens mais brilhante do que a emitida por uma fonte convencional. Outras vantagens associadas com essa radiação incluem a configuração de raios-X paralela, que simplifica o algoritmo de reconstrução tomográfica, e o uso de raios-X monocromáticos, que melhoram a acurácia das imagens reconstruídas, eliminando problemas de energia associados com a absorção de raios-X (LANDIS; KEANE, 2010).

Em equipamentos com tubos de raios-X, a característica principal de seu feixe, além de ser cônico, é policromático, ou seja, é constituído por fótons de várias energias (Figura 11A). Os fótons de mais baixa energia atingem a amostra e são mais absorvidos nas bordas, funcionando como uma barreira. O resultado é uma identificação de densidade maior do que realmente ocorre na amostra, dessa forma a imagem gerada possui as extremidades mais densas do que o interior, independente da homogeneidade do material, tornando-as mais claras nas extremidades. O nome deste efeito é *beam hardening* (Figura 11B), um dos artefatos que podem ocorrer durante a aquisição tomográfica.

Este artefato pode ser compensado utilizando filtros, corrigindo na calibragem do equipamento ou através de softwares (MOREIRA, 2013).

Figura 11 - A) Configuração de feixe de raios-X cônico e B) o efeito de *beam hardening* que é gerado pela policromaticidade dos raios emitidos na configuração cônica.



Fonte: MOREIRA, 2013.

Quando utilizada a radiação síncrotron, efeitos como o *beam hardening* não são esperados, em função da monocromaticidade e paralelismo dos raios-X emitidos pelo equipamento (LANDIS; KEANE, 2010).

3.5 Equipamentos

A análise de todas as amostras foi realizada pelo autor utilizando a *beamline* 13-BM-D do *Advanced Photon Source* (APS) no *Argonne National Laboratory* (ANL), em Chicago, Illinois. Este é um setor dedicado ao estudo de ciências da terra, que utiliza radiação síncrotron para tomografia e outras técnicas, subsidiado pela *University of Chicago*.

Este equipamento possui uma fonte de raios-X, gerada por um campo magnético, com dimensões de $10\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ quando focada, com alcance energético de 4,5 até 75 keV e monocromador do tipo Si (111) (Figura 12). Os detectores são câmeras CCD da *Princeton Instruments* com matriz de 1920×1200 pixels e campo horizontal que varia de 2 a 20 milímetros.

Figura 12 - Emissor de raios-X utilizado para as análises deste trabalho, emite radiação síncrotron com energias variando entre 4,5 e 75 keV.

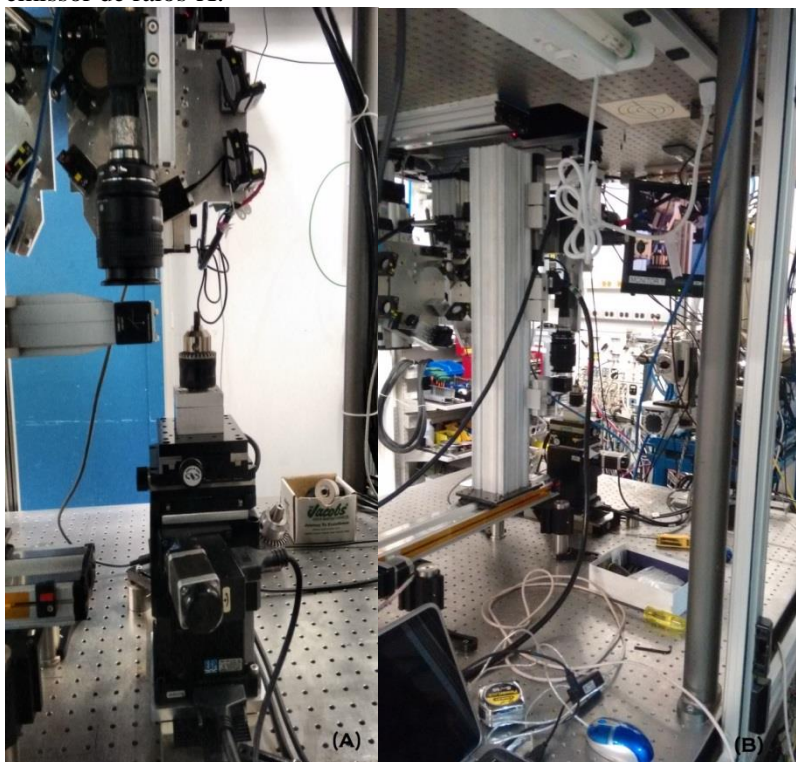


Fonte: Do Autor, 2016.

Este sistema utiliza feixe de raios-X de geometria paralela para aquisição das imagens em diferentes ângulos da amostra. A amostra

pode rotacionar de 90 em 90 graus com um passo fixo. Cada passo produz uma projeção que é salva como arquivo de 16 bits na extensão TIFF (Figura 13).

Figura 13 - (A) Suporte giratório de amostra no centro da imagem, com cintilador à esquerda e uma câmera CCD logo acima. (B) Visão geral do equipamento de radiação síncrotron, ao fundo é possível observar o emissor de raios-X.



Fonte: Do Autor, 2016.

3.6 Aquisição, processamento e análise das imagens.

3.6.1 Aquisição

Para aquisição tomográfica foi utilizada resolução de $4,33\ \mu\text{m}$, com amostras cortadas na forma de plugue, com 8 milímetros de

diâmetro e aproximadamente 3 cm de altura, variando de acordo com a resistência da rocha (Figura 14).

Figura 14 - Broca utilizada no corte das amostras, com coroa diamantada e espaço interno de 8 milímetros. O tamanho da amostra varia com a resistência da rocha, mas não ultrapassando 3 centímetros (tamanho total do espaço interno da broca).



Fonte: Do Autor, 2016

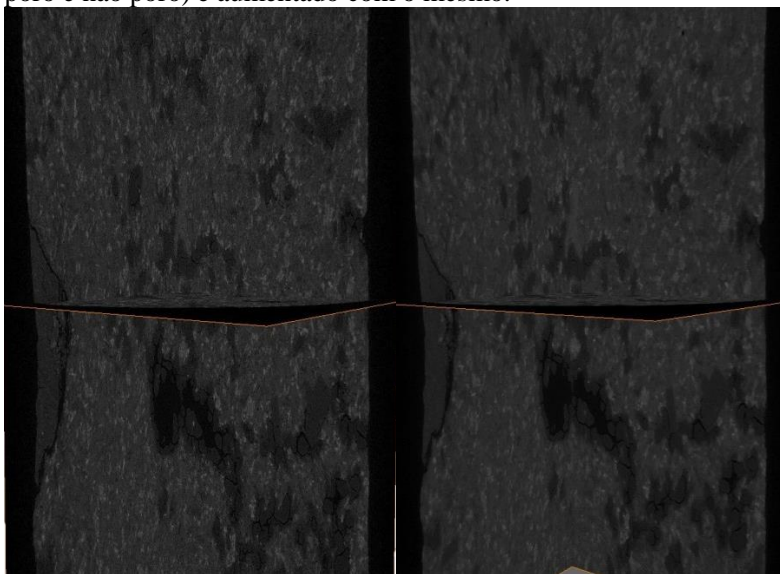
As configurações utilizadas para as análises foram de 900 ângulos de exposição, com tempo de 1 segundo e energia de 35 keV e rotação de 90°.

A reconstrução das projeções foi realizada utilizando o software ImageJ, adaptado com um algoritmo criado pelo Professor Dr. Mark L. Rivers, da *University of Chicago*. Posteriormente foram submetidas às etapas de filtragem, binarização e definição da região de interesse para análise do meio poroso. No processo de reconstrução é utilizado um processo matemático, que converte as informações das projeções em imagens tomográficas 2D.

3.6.2 Pré-processamento (filtro mediano)

A utilização de filtros antes do processamento das imagens serve para realçar feições de interesse e diminuir ou eliminar ruídos. Nesta análise foi utilizado o filtro mediano, um método não linear que remove os ruídos preservando as extremidades. É muito efetivo para remover os ruídos do tipo “sal e pimenta”, fazendo uma varredura nos pixels da imagem substituindo cada valor de tom de cinza pelo valor mediano dos pixels vizinhos (Figura 15).

Figura 15 - Projeções sem filtro (esquerda) e após a passagem do filtro mediano (direita). É possível observar a perda de resolução dos cristais na imagem filtrada. No entanto, o contraste de interesse (entre região poro e não poro) é aumentado com o mesmo.



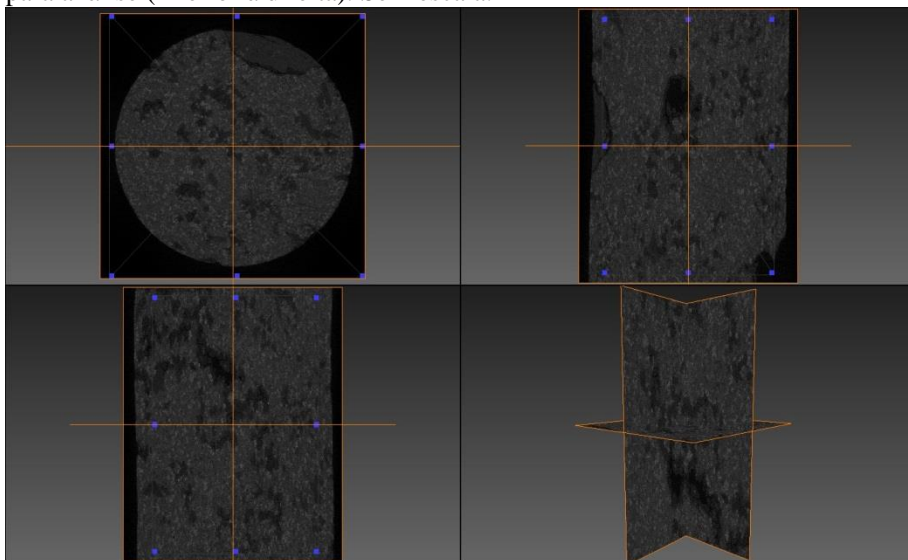
Fonte: Do Autor, 2016.

3.6.3 Região de interesse

Região de interesse (ROI) é uma região da amostra bidimensional, pois esta pode ser muito grande para a análise em razão das limitações computacionais ou até mesmo para evitar que elementos fora da imagem sejam calculados como porosidade e permeabilidade da amostra. A definição da região é muito importante, pois esta deve ter

uma porção significativa da amostra. Logo, deve ser grande o suficiente para ser representativo de toda a amostra. Em análises 3D, deve-se definir um volume de interesse (VOI), que seja um somatório de todos os ROIs de um conjunto contíguo de imagens transversais. Neste trabalho, o VOI utilizado foi de 640x580x1000 para todas as amostras analisadas. (Figura 16).

Figura 16 - Definição da ROI para a análise de porosidade, com a definição do tamanho da caixa (azul) nas três dimensões e seu resultado para análise (inferior à direita). Sem escala.

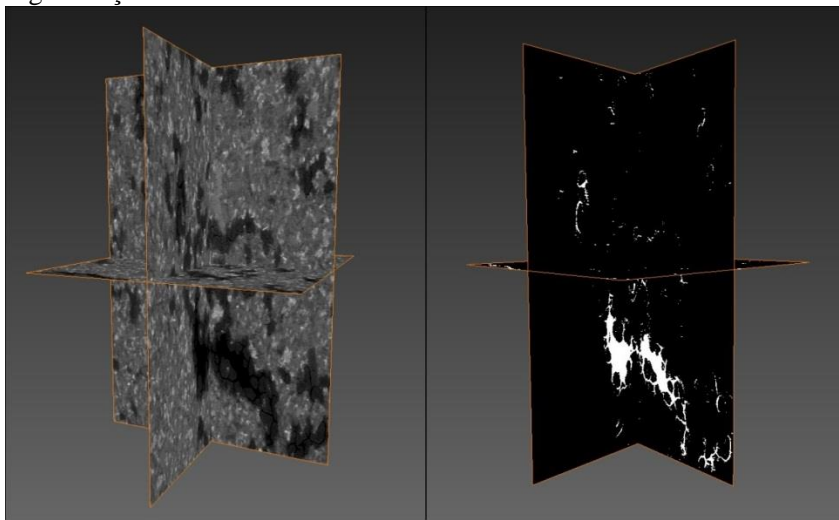


Fonte: Do Autor, 2016.

3.6.4 Segmentação Binária (processamento)

Segmentação binária, ou binarização, é o processo que consiste em converter uma imagem, originalmente em tons de cinza, apenas com pixels pretos e brancos (Moreira, 2013). As imagens microtomográficas geradas por radiação síncrotron, em 16-bits, são formadas por níveis de cinza distribuídos ao longo de um histograma com 65.537 tonalidades. Desta forma, na binarização o usuário escolhe um limiar no histograma, que melhor separe suas fases de interesse da imagem, ou seja, que melhor definam quais serão as fases poro (branco) e quais serão não poro (preto) (Figura 17).

Figura 17 - Processo de binarização: à direita a imagem em tons de cinza e à esquerda apenas em preto (não poro) e branco (poro) após a segmentação binária.



Fonte: Do Autor, 2016.

3.7 Caracterização da porosidade

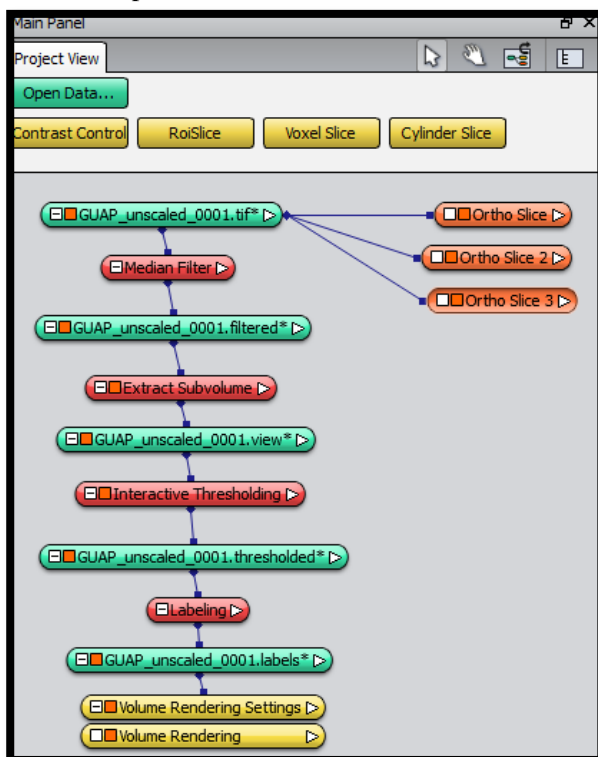
Com as imagens digitais das amostras é possível realizar uma análise qualitativa do sistema poroso, além da possibilidade de quantificar os parâmetros microestruturais, como o valor de porosidade e a permeabilidade. Neste trabalho foi realizada apenas a análise qualitativa do meio poroso, utilizando um software a ser especificado a seguir.

3.7.1 Avizo Fire 8.1

O Avizo é um software licenciado para análise 3D de dados científicos e industriais desenvolvido pela FEI Company Inc., empresa especializada em microscopia de alto desempenho utilizado no processamento tridimensional de imagens para aplicações nas áreas de engenharia e geociências, principalmente. Possui inúmeras opções para processamento, exploração e análise de dados, além de uma interface de fácil compreensão e utilização.

O programa foi utilizado no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a qual possui a licença de usuário para o mesmo. No software foi possível reconstruir em duas e três dimensões as imagens obtidas no microtomógrafo. O empilhamento 2D foi gerado com o comando *Ortho Slice*, que mostra as projeções nos três eixos, com a possibilidade de visualizar os três ao mesmo tempo. O sólido 3D do meio poroso foi gerado a partir do comando *Volume Rendering*, sendo que ambos os modos de visualização sofreram cortes através da ferramenta *Extract Subvolume*. A ferramenta utilizada para realizar a segmentação binária foi a *Interactive Threshold*, com valores variantes para cada amostra. Para uma melhor visualização dos poros das amostras, foi usada a ferramenta *Labeling*, que rotula os mesmos baseando-se em sua conectividade. Todos os passos são ilustrados na Figura 18.

Figura 18 - Comandos de ortho slice, median filter, extract subvolume, interactive threshold, labeling e volume rendering no software Avizo Fire 8.1, respectivamente.



Fonte: Do Autor, 2016.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização e localização das amostras

Todas as nove amostras utilizadas neste trabalho são de rochas vulcânicas basálticas da Formação Serra Geral, do acervo do LabLam (Laboratório de Laminação) da Universidade Federal de Santa Catarina, ou de outros projetos de pesquisa de laboratórios e pesquisadores parceiros do Paraná e Rio Grande do Sul, com exceção de uma amostra coletada no estado de Santa Catarina.

Os derrames da Formação Serra Geral chegam a atingir espessura máxima de 1.700 metros (ALMEIDA, 1986). Dispõe-se sobre os arenitos eólicos da Formação Botucatu ou diretamente sobre as rochas do embasamento pré-cambriano (ALMEIDA; CARNEIRO; BARTORELLI, 2012) e são compostos majoritariamente por rochas básicas (97,5%) comparado com as ácidas (2,5%).

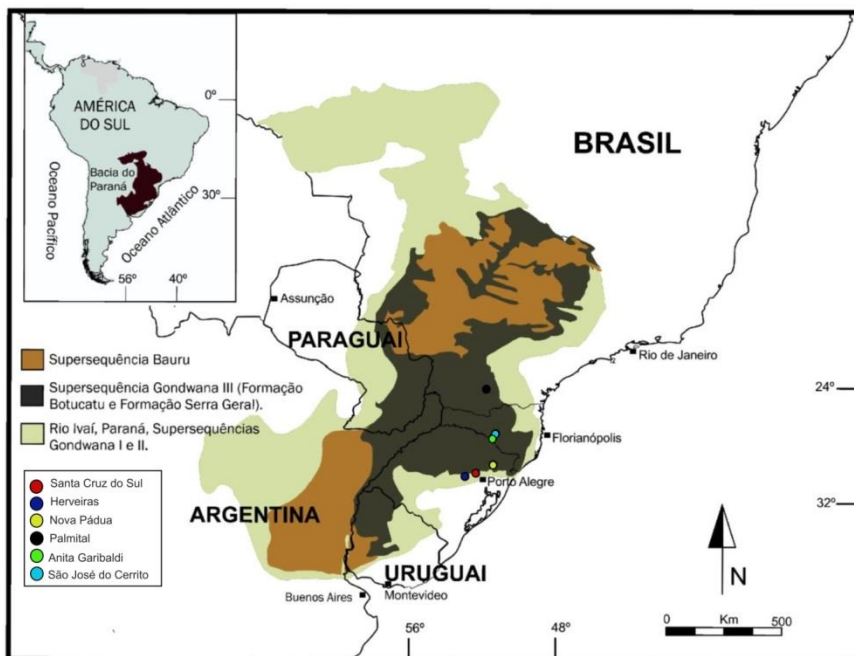
Em Santa Catarina, as amostras são das cidades de São José do Cerrito e Anita Garibaldi. No Paraná, da cidade de Palmital e no Rio Grande do Sul, das cidades de São Marcos, Nova Pádua, Santa Cruz do Sul, Herveira e outros afloramentos às margens da BR-101, conforme Tabela 2 e Figura 19 abaixo.

Tabela 2 - Tabela descritiva com as amostras utilizadas neste trabalho, junto com sua localidade, tipo de derrame e de qual parte dele foi coletada.

TABELA DE AMOSTRAS			
<u>AMOSTRA</u>	<u>LOCALIDADE</u>	<u>DERRAME</u>	<u>DIVISÃO</u>
GUA-P	PALMITAL/PR	PAHOEHOE	TOPO
BG-1	ANITA GARIBALDI/SC	RUBBLY PAHOEHOE	TOPO
SR	SÃO JOSÉ DO CERRITO/SC	RUBBLY PAHOEHOE	TOPO
S1	SANTA CRUZ DO SUL/RS	PAHOEHOE	TOPO
S2	SANTA CRUZ DO SUL/RS	PAHOEHOE	TOPO
S3	SANTA CRUZ DO SUL/RS	PAHOEHOE	BASE
S5	HERVEIRAS/RS	RUBBLY PAHOEHOE	NÚCLEO
S6	HERVEIRAS/RS	PAHOEHOE	BASE
NPIB	NOVA PÁDUA/RS	ÁCIDO	BASE

Fonte: Do Autor, 2016.

Figura 19 - Mapa com a localização das cidades em que as amostras foram coletadas.



Fonte: Modificado de Waichel et al., (2013).

As amostras utilizadas são de derrames tipo *pahoehoe* (GUAP, S1, S2, S3, e S6), *rubblly pahoehoe* (BG, SR, S5) e uma vulcânica ácida (NP1B), abrangendo, assim, os diferentes litotipos e estruturas internas dos derrames, de base, meio e topo.

4.2 Derrames *Pahoehoe*

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos sobre o meio poroso de todas as amostras de derrames do tipo *pahoehoe* (Figura 20), além de sua contextualização.

Figura 20 - Amostras dos derrames *pahoehoe*, da esquerda para a direita: GUAP, S1, S2, S3 e S6.



Fonte: Do Autor, 2016.

Derrames deste tipo são caracterizados pela formação de três zonações horizontais, basal, centro e topo (AUBELE; CRUMPLER; ELSTON, 1988). A porção basal se apresenta vesiculada, com espessura de 30 a 40 cm. O centro do derrame se mostra denso, não vesiculado, tem granulação média, eventualmente com estruturas acamadadas, que geralmente possuem pouca ou nenhuma vesícula (microvesículas); e um topo vesiculado, com aproximadamente metade da espessura total do fluxo, em que se concentram a maior densidade vesicular do derrame.

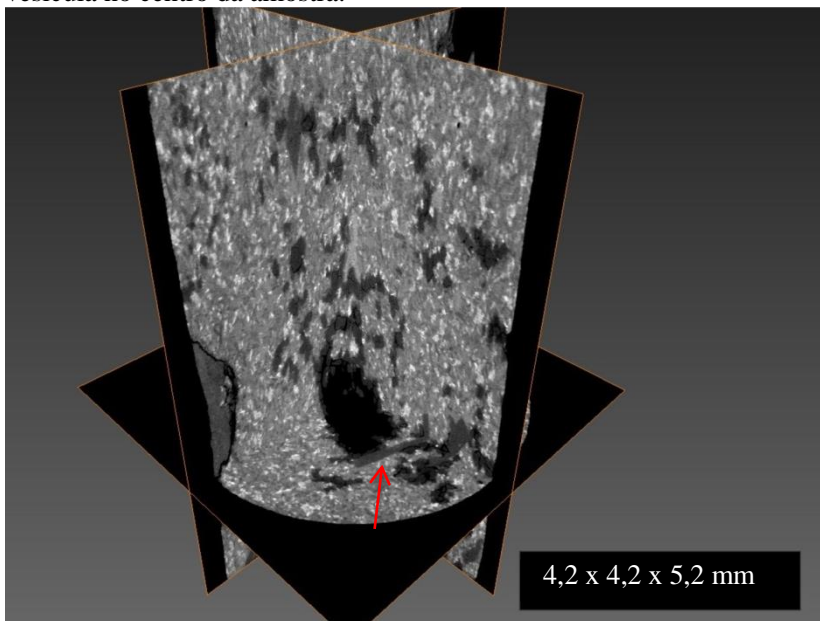
4.2.1 GUA-P

Esta amostra da litofácies basalto vesiculado do topo de um derrame foi coletada na cidade de Palmital, no estado do Paraná, em projetos anteriores do Professor Dr. Breno Leitão Waichel (UFSC/SC). Foi anteriormente descrita em lâmina delgada por Becker (2014), com microfenocristais de plagioclásio e piroxênio (40%) sobre uma matriz vítrea (40%), além de uma alta densidade vesicular (20%). Entre os microfenocristais, o plagioclásio é o mais abundante (subédricos e euédricos tabulares finos).

Na reconstrução bidimensional é comprovada a abundância dos microfenocristais de plagioclásio, pelo seu formato característico e tons

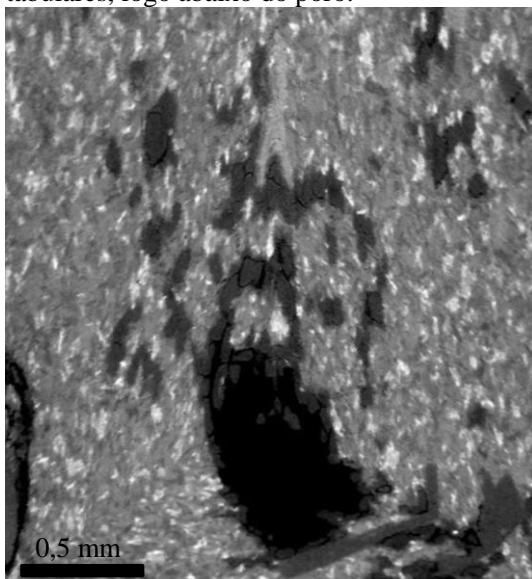
de cinza um pouco mais escuros (indicado pela seta), além de cristais de piroxênio menores e mais claros do que os plagioclásios, devido a sua maior densidade (Figura 21 e Figura 22).

Figura 21 - Reconstrução microtomográfica bidimensional da amostra GUAP, evidenciando microfenocristais de plagioclásio próximos à vesícula no centro da amostra.



Fonte: Do Autor, 2016.

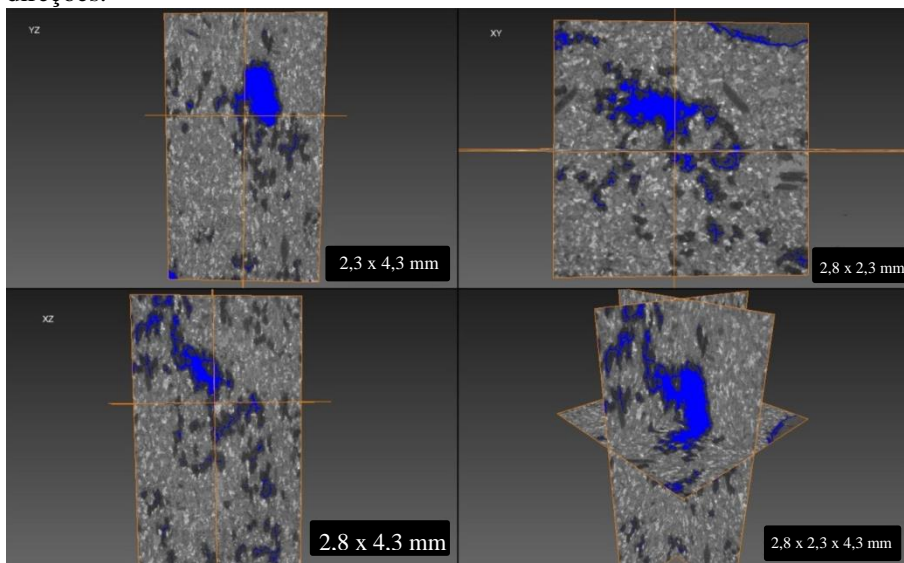
Figura 22 – *Zoom* da reconstrução microtomográfica bidimensional, com enfoque para a vesícula no centro da amostra e os cristais de plagioclásio tabulares, logo abaixo do poro.



Fonte: Do Autor, 2016.

Quanto ao meio poroso da amostra, possui grande número de vesículas (em preto), de diversos tamanhos, parcialmente preenchidas por um mineral menos denso do que o plagioclásio (tonalidade de cinza mais escura), possivelmente zeolitas, eventualmente dissolvidas por processos intempéricos. No entanto, o preenchimento efetivo da porosidade está restrito aos poros menores, com a maior parte da porosidade atribuída a uma grande vesícula no interior da amostra, a qual possui apenas parte da sua borda precipitada por minerais secundários (Figura 23).

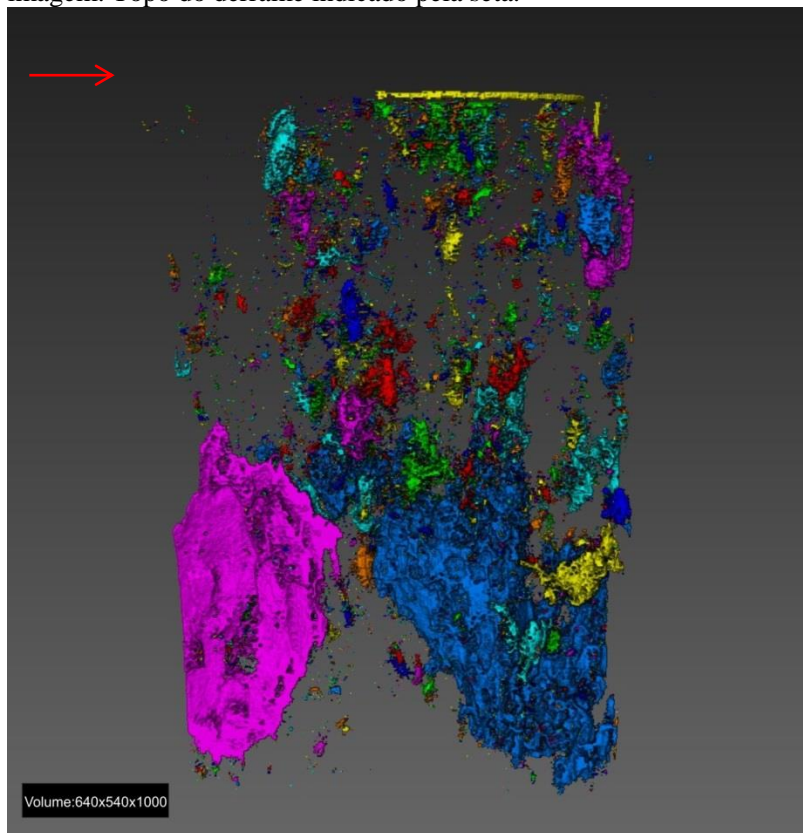
Figura 23 - Imagem binarizada sobrepondo o ROI da reconstrução 2D nos três eixos principais (YZ, XY e XZ), com vesículas (azul) provenientes de exsolução de gases e dissolução intempérica nas três direções.



Fonte: Do Autor, 2016.

A reconstrução 3D foi feita apenas na imagem binarizada, permitindo uma melhor visualização do meio poroso, com destaque para uma grande vesícula, além de outras pequenas distribuídas ao longo da amostra (Figura 24). Como esperado em uma amostra de topo de derrame *pahoehoe*, a amostra apresenta grande densidade vesicular, de diversos tamanhos e morfologias.

Figura 24 - Reconstrução 3D dos poros rotulados da amostra, com destaque para os dois grandes poros (rosa e azul) que se destacam na imagem. Topo do derrame indicado pela seta.



Fonte: Do Autor, 2016.

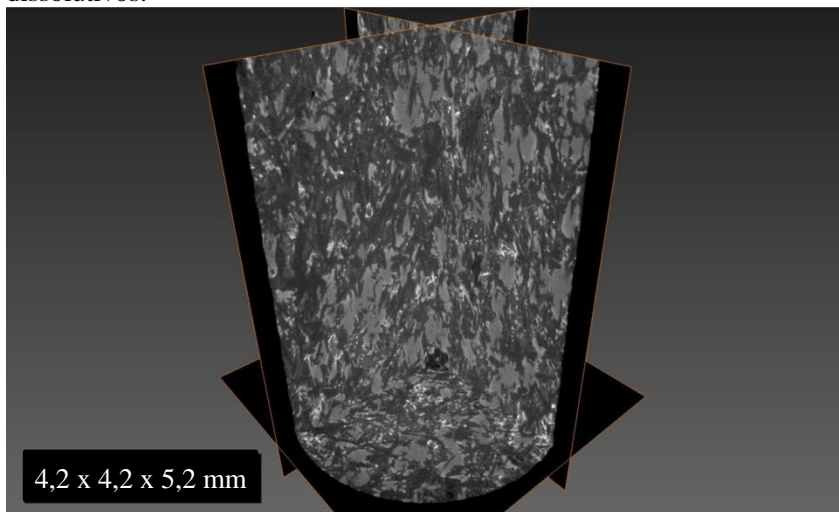
Segundo a classificação de Zou et al. (2013), essa amostra possui porosidade primária do tipo vesicular. Foi submetida a um processo secundário de precipitação mineral nestas vesículas e posteriormente este material do preenchimento foi submetido à dissolução intempérica, o que caracteriza uma porosidade secundária. Quando o processo formador é relacionado com dissolução, o mineral dissolvido dará nome ao tipo de porosidade.

4.2.2 S1

Esta amostra da litofácies basalto vesiculado de topo de derrame foi coletada próxima à cidade de Santa Cruz do Sul, no estado do Rio Grande do Sul, pelo Professor Dr. Breno Leitão Waichel. Esta amostra não foi anteriormente descrita em lâmina delgada.

Na reconstrução microtomográfica bidimensional é observado uma orientação de fluxo incipiente dos cristais na amostra, sobre uma matriz mais densa definida pela tonalidade de cinza mais escura. Nesta encontra-se a maior densidade de poros da amostra (Figura 25).

Figura 25 - Reconstrução microtomográfica 2D da amostra S1, com baixa porosidade oriunda de vesículas e evidenciando alguns processos dissolutivos.

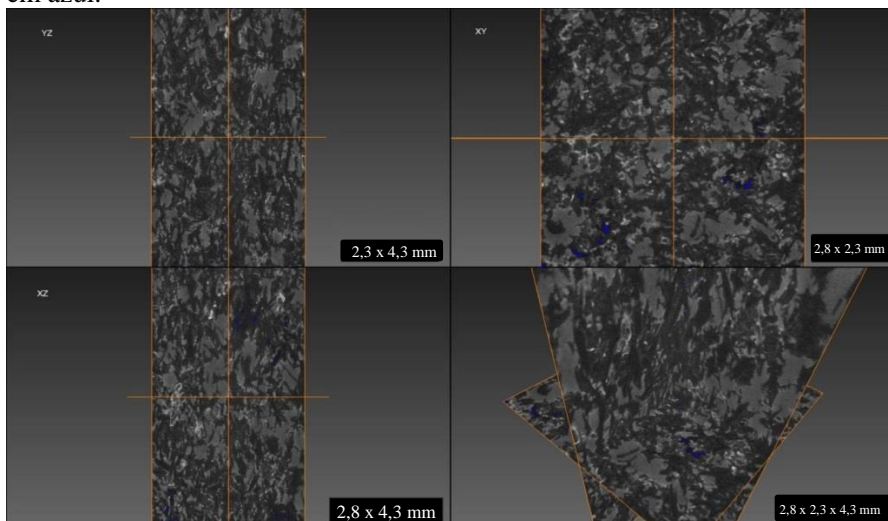


Fonte: Do Autor, 2016.

A formação dos poros pode estar associada tanto à formação de microvesículas durante a solidificação da lava, caracterizando uma porosidade primária, como a processos secundários de intemperismo e dissolução, que tendem a ocorrer preferencialmente na matriz por ser mais fina do que demais cristais (

Figura 26).

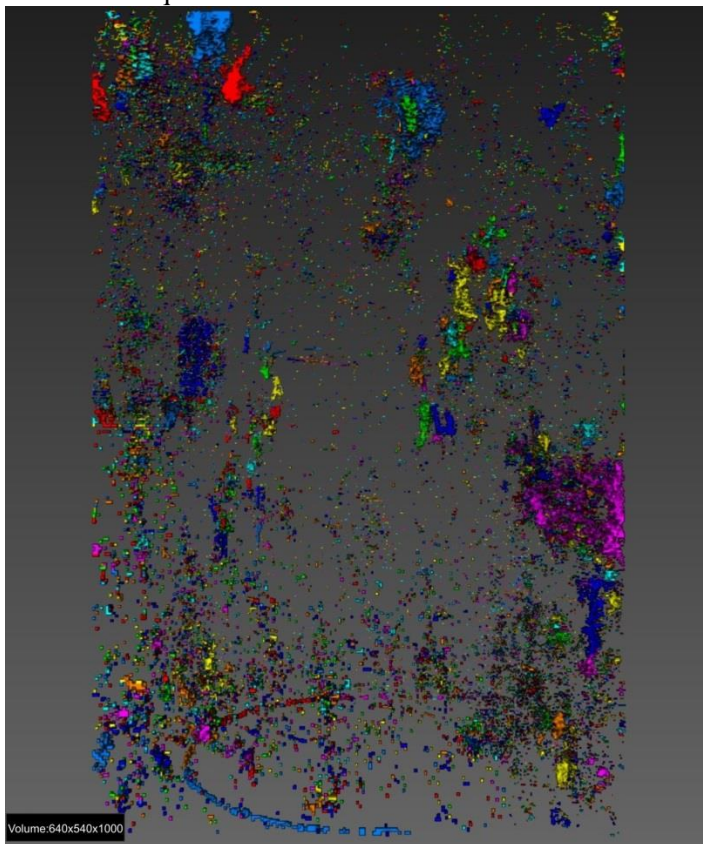
Figura 26 - Imagem binarizada sobrepono a reconstrução bidimensional, com baixa densidade de poros. No eixo YZ a porosidade é quase nula, enquanto que nos demais (XY e XZ) é incipiente. Poros em azul.



Fonte: Do Autor, 2016

Na reconstrução tridimensional é observada a morfologia dos poros, assim como a conexão entre eles (permeabilidade). Em sua maioria os poros são pontuais com exceção de alguns maiores. Entretanto, não formam permeabilidade efetiva visível nesta resolução, pois não há conectividade. Os poros maiores apresentam um padrão morfológico que pode ser explicado pela exsolução de voláteis em processos de segunda ebulição, favorecendo a formação de microvesículas. Os poros menores não possuem padrão morfológico e estão sobre a matriz da amostra, caracterizando uma porosidade secundária (Figura 27).

Figura 27 - Reconstrução do meio poroso da amostra, evidenciando a maioria dos poros oriundos de dissolução e poucos provenientes de exsolução de voláteis, uma vez que estes são mais pontuais e menos contínuos do que vesículas.



Fonte: Do Autor, 2016.

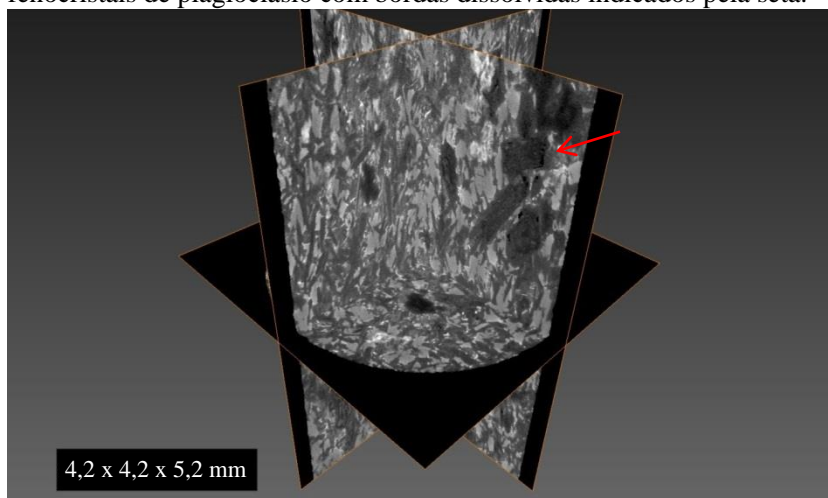
Baseado na classificação de Zou et al. (2013), essa amostra apresenta porosidade primária do tipo vesicular. No caso, uma variação microvesicular e uma porosidade secundária de dissolução provavelmente em feldspatos, gerada por processos intempéricos.

4.2.3 S2

Esta amostra da litofácies basalto vesiculado de topo de derrame foi coletada no mesmo afloramento da amostra S1, também pelo Professor Dr. Breno Leitão Waichel. A amostra não foi descrita em lâmina delgada anteriormente.

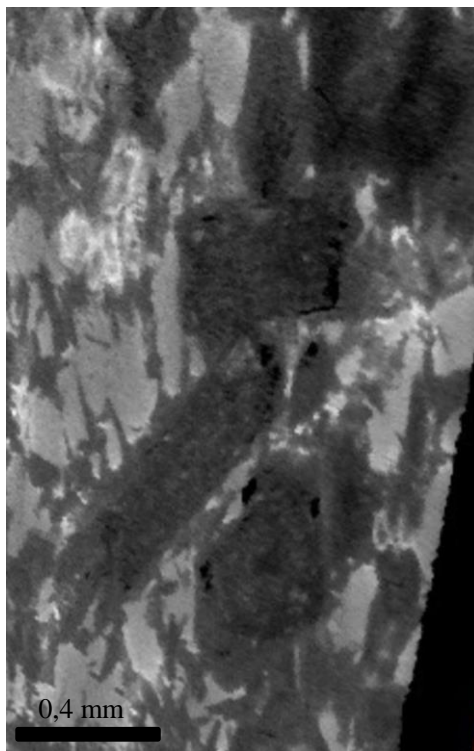
Diferentemente do esperado, a reconstrução tomográfica 2D da amostra revelou uma baixa densidade vesicular, com fenocristais de plagioclásio destacados e com feições de dissolução em suas bordas (Figura 28 e Figura 29).

Figura 28 - Reconstrução microtomográfica 2D da amostra S2, com fenocristais de plagioclásio com bordas dissolvidas indicados pela seta.



Fonte: Do Autor, 2016.

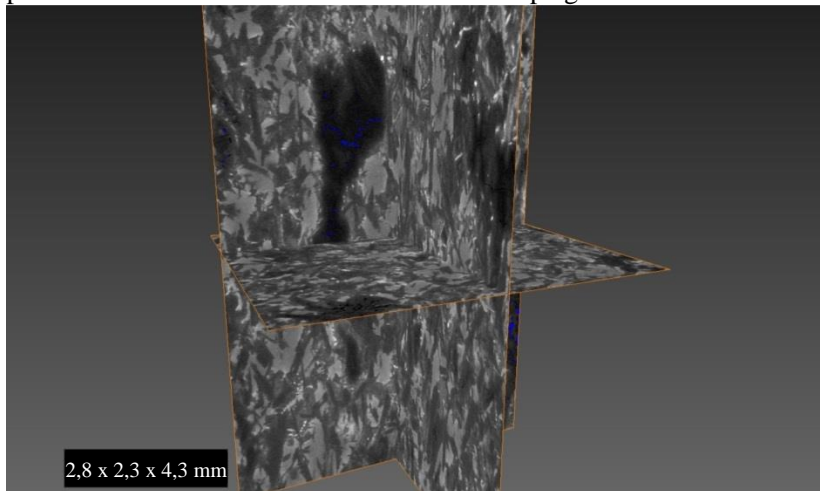
Figura 29 – *Zoom* da reconstrução bidimensional da amostra S2, evidenciando os cristais de plagioclásio com as bordas dissolvidas (preto).



Fonte: Do Autor, 2016.

Nas seções basais pode ser observado alto grau de dissolução, enquanto que nas seções laterais a dissolução é restrita às extremidades. Ainda é possível observar uma vesícula de tamanho considerável na amostra, apesar de preenchida (Figura 30).

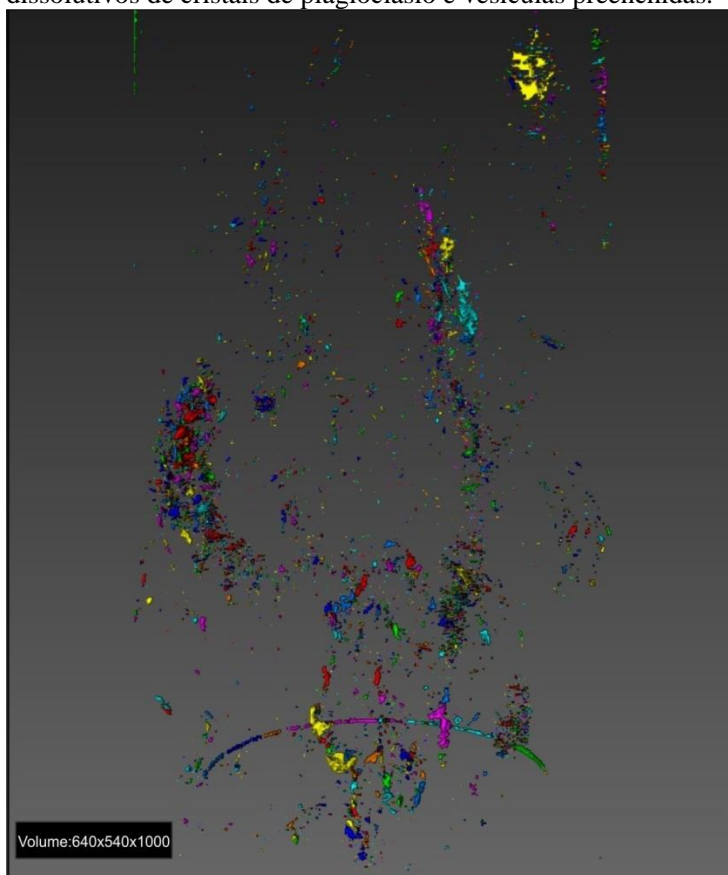
Figura 30 - Reconstrução bidimensional com ênfase na vesícula preenchida (tons de cinza mais escuros) e dissolução incipiente no centro da amostra (azul). Outros processos dissolutivos geradores de porosidade são observados nos fenocristais de plagioclásio.



Fonte: Do Autor, 2016.

A baixa densidade vesicular é comprovada na reconstrução 3D do meio poroso, em que são poucos os poros com feições de escape de voláteis. Em geral, estes estão preenchidos e com feições incipientes de dissolução. A maior parte dos poros apresentam feições pontuais e dispersas, típico de processos de dissolução em cristais, principalmente de plagioclásio. Alguns destes poros podem ser oriundos de processos de segunda ebulição, gerando microvesículas (Figura 31).

Figura 31 - Reconstrução 3D do meio poroso da amostra S2, com poucos poros vesiculares, sendo a grande maioria oriunda de processos dissolutivos de cristais de plagioclásio e vesículas preenchidas.



Fonte: Do Autor, 2016.

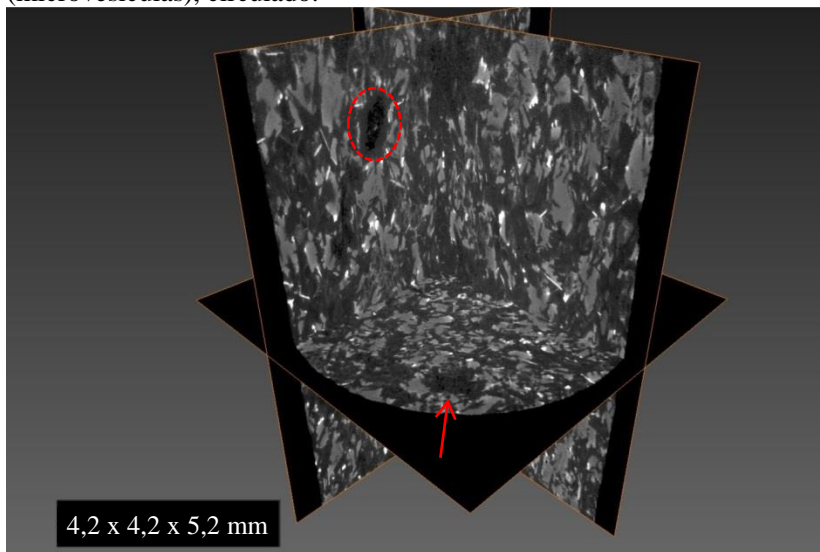
Fundamentado na classificação de Zou et al. (2013), esta amostra apresenta porosidade primária do tipo vesicular, além da variação microvesicular, junto com porosidade secundária por dissolução de cristais de feldspato e do material que preenche as vesículas. Feldspatos são dissolvidos em meio ácido, formando poros irregulares, preferencialmente ao longo dos planos de clivagem, preservando a forma do cristal.

4.2.4 S3

Esta amostra da litofácies basalto vesiculado de base de derrame foi coletada próxima à cidade de Santa Cruz do Sul, no estado do Rio Grande do Sul, pelo Professor Dr. Breno Leitão Waichel. A descrição petrográfica desta amostra não foi previamente feita por nenhum autor.

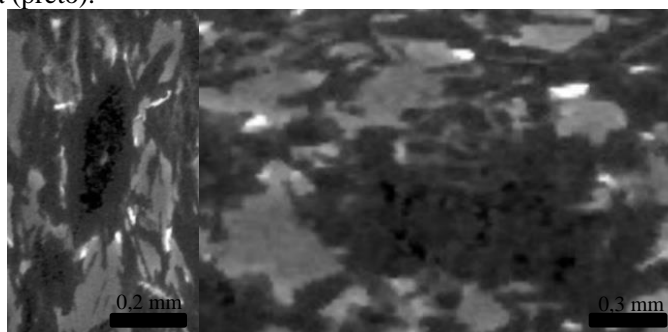
A reconstrução microtomográfica bidimensional revelou certa semelhança com a amostra S2, apesar de serem de zonas diferentes do derrame (Figura 32 e Figura 33). A identificação de minerais nesta amostra é dificultada pelo tamanho e forma dos cristais. No entanto, possui uma matriz microcristalina com indícios de processos dissolutivos, que geraram praticamente todos os poros da rocha.

Figura 32 - Reconstrução bidimensional da amostra S3 em que é possível observar poros oriundos de dissolução (pontuais), indicado pela seta e alguns maiores, que indicam processos vesiculares (microvesículas), circulado.



Fonte: Do Autor, 2016.

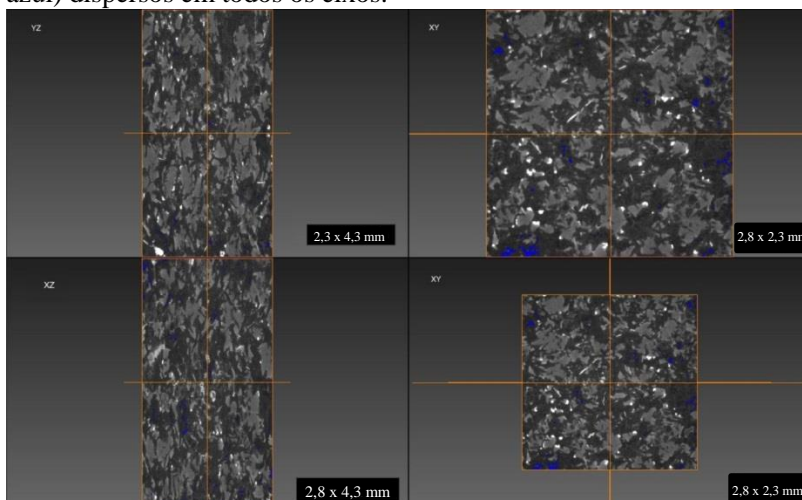
Figura 33 – *Zoom* das feições destacadas na reconstrução bidimensional da amostra S3, com a vesícula à esquerda (preto) e poros de dissolução à direita (preto).



Fonte: Do Autor, 2016.

Como esperado de uma amostra de base de derrame *pahoehoe*, esta apresenta vesículas nas imagens 2D, estas são irregulares e geralmente preenchidas (amígdalas) (Figura 34).

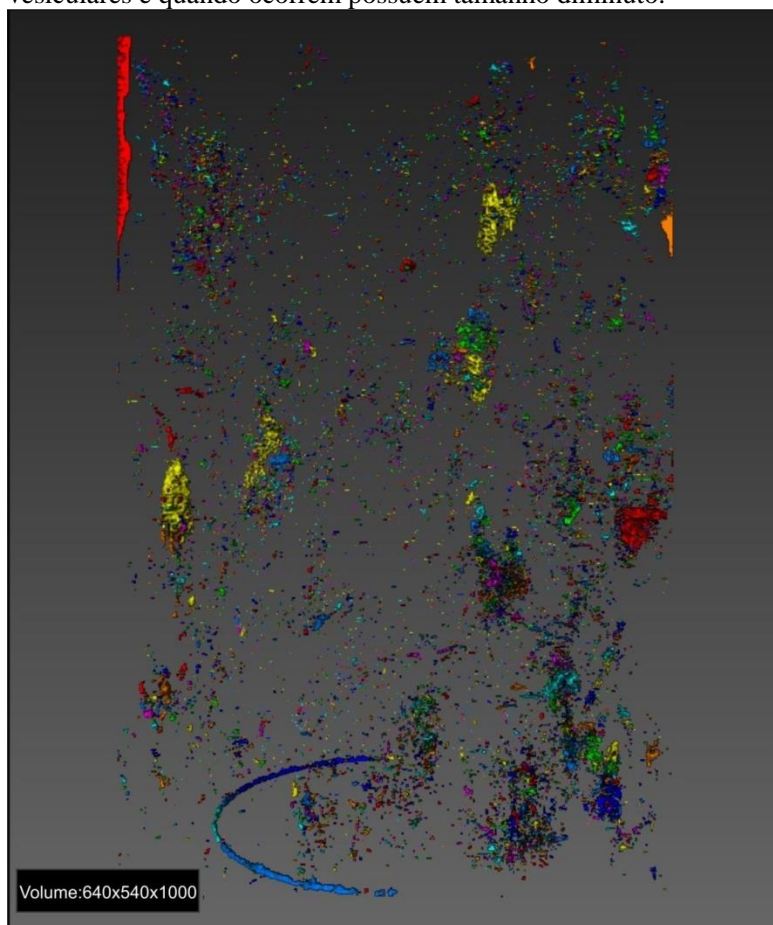
Figura 34 - Imagem binarizada sobrepondo a reconstrução bidimensional da amostra nos três eixos (YZ, XY e XZ), com poros (em azul) dispersos em todos os eixos.



Fonte: Do Autor, 2016.

No entanto, na reconstrução tridimensional do meio poroso observam-se, além de poros dispersos e pontuais característicos de dissolução, poros com tendência morfológica, possivelmente microvesículas (Figura 35). Apesar dos poros microvesiculares serem maiores volumetricamente, a maior parte da porosidade da rocha é atribuída aos poros de dissolução.

Figura 35 - Reconstrução 3D do meio poroso, confirmando as imagens bidimensionais que indicam poros dispersos, oriundos de dissolução. São observados poucos poros contínuos que resultam de processos vesiculares e quando ocorrem possuem tamanho diminuto.



Fonte: Do Autor, 2016.

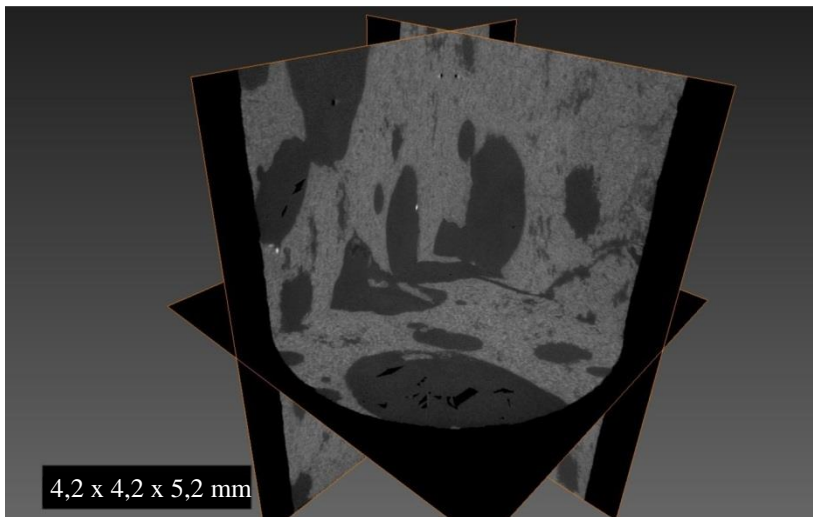
Pela classificação baseada em imagens 2D de Zou et al. (2013), esta amostra apresenta porosidade primária microvesicular, gerada em processos de segunda ebulição, além da porosidade secundária proveniente da dissolução da matriz microcristalina da rocha. A dificuldade de identificação de minerais utilizando microtomografia de raios-X fica evidente nesta amostra, pois a técnica não fornece orientação dos eixos cristalográficos, tornando-se difícil de identificar os limites de minerais quando os mesmos estão se sobrepondo.

4.2.5 S6

Esta amostra da litofácies basalto vesiculado de base de derrame foi coletada próxima à cidade de Herveiras, no estado do Rio Grande do Sul, pelo Professor Dr. Breno Leitão Waichel. Descrições petrográficas desta amostra não foram previamente feitas por nenhum autor.

Pela reconstrução microtomográfica bidimensional é observada uma alta densidade de vesículas, esperada em base de derrames do tipo *pahoehoe*. No entanto, aparentam estar preenchidas por um material pouco denso, provavelmente zeolitas (Figura 36).

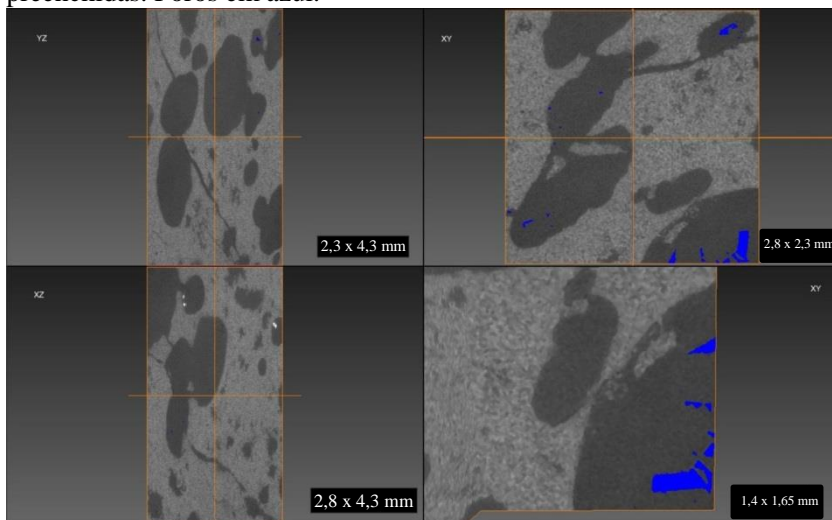
Figura 36 - Reconstrução microtomográfica 2D da amostra S6, com grandes vesículas preenchidas (cinza escuro) e com o preenchimento parcialmente dissolvido (preto). Pela forma dos poros a dissolução ocorreu em cristais euédricos lamelares (zeolitas observadas na amostra de mão).



Fonte: Do Autor, 2016.

Toda a porosidade observada na amostra aparenta ser oriunda da dissolução do material precipitada nas vesículas, ora pontual, ora com geometria bem definida. Em uma das extremidades da amostra há uma fratura de intemperismo incipiente cortando a rocha. Esta não está preenchida, mas aparenta apresentar pouca contribuição para a porosidade total da rocha ou conexão do meio poroso (Figura 37).

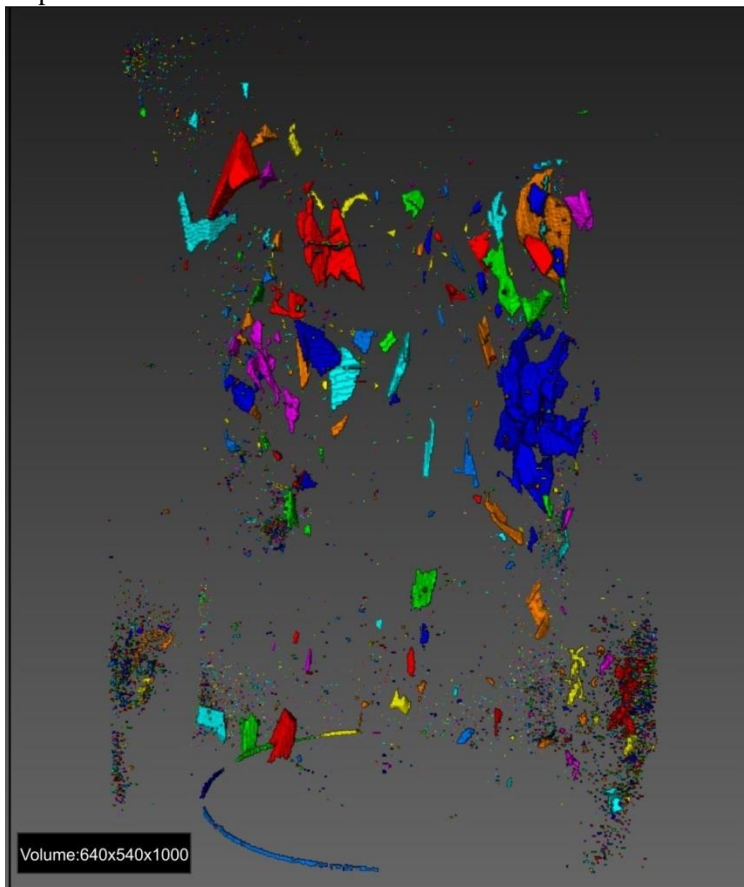
Figura 37 - Imagem binarizada sobrepondo a reconstrução bidimensional nos três eixos (YZ, XY e XZ), evidenciando a dissolução de cristais euédricos principalmente nos eixos XY. Os outros dois eixos apresentam baixa porosidade, apenas com grandes vesículas preenchidas. Poros em azul.



Fonte: Do Autor, 2016.

Utilizando as imagens 3D da reconstrução microtomográfica, comprova-se a alta densidade de poros oriundos de dissolução, porém com a particularidade de serem angulosos e terem geometria, fato que pode ser explicado pela dissolução total de cristais euédricos precipitados no interior das vesículas. No entanto, também há a porosidade oriunda de processos dissolutivos incipientes, gerando espaços pontuais e dispersos na rocha. Como já observado na reconstrução 2D, a fratura de intemperismo não contribui efetivamente para a porosidade e permeabilidade da amostra, sendo inclusive de difícil identificação em meio aos demais poros (Figura 38).

Figura 38 - Reconstrução tridimensional do meio poroso da amostra S6, com poros angulosos e contínuos, oriundos da dissolução de cristais que preenchem as vesículas, além de poros de dissolução pontuais e dispersos na amostra.



Fonte: Do Autor, 2016.

Desta forma é observado um primeiro processo formador de vesículas, que não gerou porosidade efetiva, pois foram posteriormente preenchidas, e um segundo processo intempérico formador da porosidade efetiva da rocha, através da dissolução do material das amígdalas e pela formação de fraturas de intemperismo.

4.3 Derrames *Rubbly Pahoehoe*

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos sobre o meio poroso das amostras de derrames do tipo *rubbly pahoehoe* (Figura 39), juntamente com descrições já realizadas previamente por Becker (2014) nas amostras BG e SR.

Figura 39 - Amostras dos derrames *rubbly pahoehoe*, da esquerda para a direita: BG, SR e S5.



Fonte: Do Autor, 2016.

Derrames *rubbly pahoehoe* são um tipo de derrame transicional, entre *pahoehoe* e 'a'a, com uma base vesiculada, núcleo maciço e topo brechado (DURAIWAMI; BONDRE; MANAGAVE, 2008). Derrames deste tipo possuem quatro partes quanto a sua estruturação interna: crosta inferior vesiculada, núcleo maciço, crosta superior vesiculada e topo brechado (KESZTHELYI, 2002; GUILBAULD, 2003).

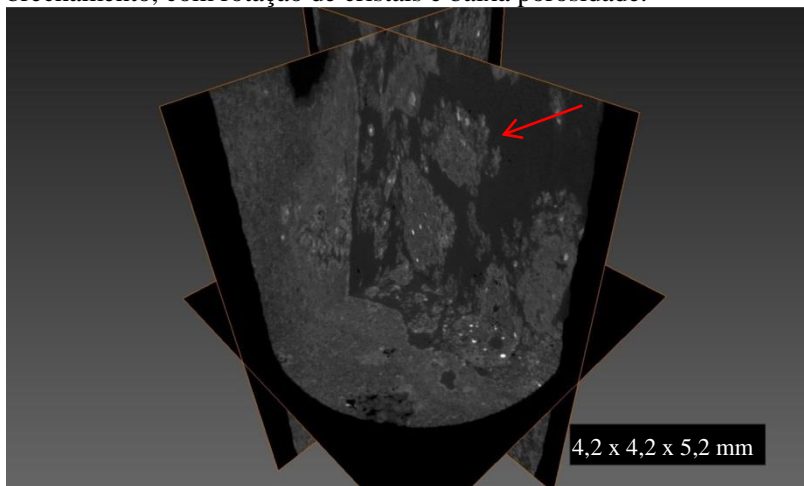
4.3.1 BG

Esta amostra da litofácies brecha escoriácea porosa de topo de derrame foi coletada na cidade de Anita Garibaldi, no estado de Santa Catarina, pelo autor deste trabalho. Foi anteriormente descrita em lâmina delgada por Becker (2014) com matriz microcristalina (70%) formada por clinopiroxênio, ripas de plagioclásio, minerais opacos e zeolitas (30%), que preenchem vesículas e fraturas sem orientação

preferencial. O processo de fraturamento ocorreu por brechação, anterior ao resfriamento ou hidraulicamente, justificando a orientação caótica dos cristais submetidos à rotação.

As projeções bidimensionais da amostra comprovam a presença de uma matriz microcristalina, em que é difícil diferenciar os cristais por meio da microtomografia de raios-X, ficando em evidência apenas os minerais opacos (tons de cinza muito claros) em razão de suas altas densidades. O brechamento é evidente, pois os fragmentos fraturados sofreram rotação e distribuem-se de maneira caótica na rocha, indicado pela seta (Figura 40).

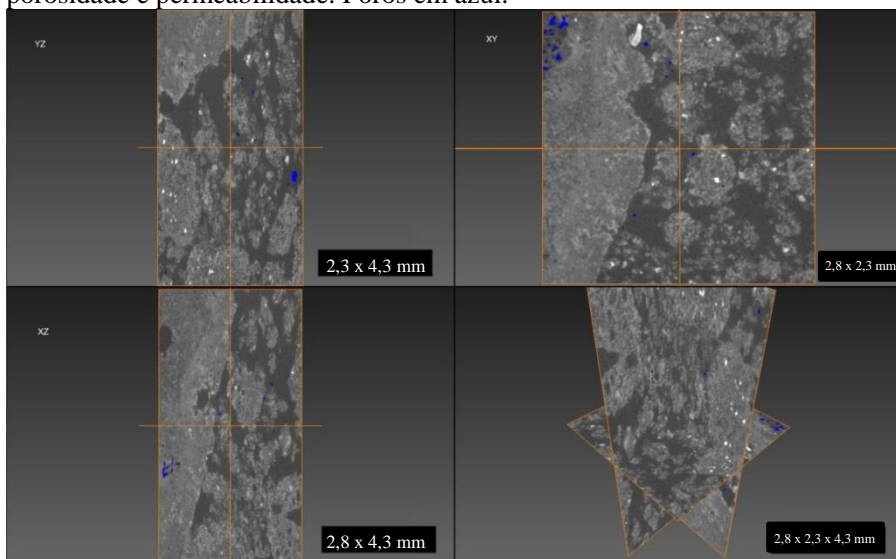
Figura 40 - Reconstrução microtomográfica 2D da amostra BG, com material muito fino proveniente de remobilização devido ao brechamento, com rotação de cristais e baixa porosidade.



Fonte: Do Autor, 2016.

Por ser do topo de um derrame *rubbly pahoehoe* é esperado uma alta densidade vesicular. No entanto, as vesículas estão invariavelmente preenchidas, fazendo com que a única porosidade da rocha seja proveniente de processos dissolutivos, da matriz, do material que preenche as vesículas e do material remobilizado pelos efeitos do fraturamento (Figura 41).

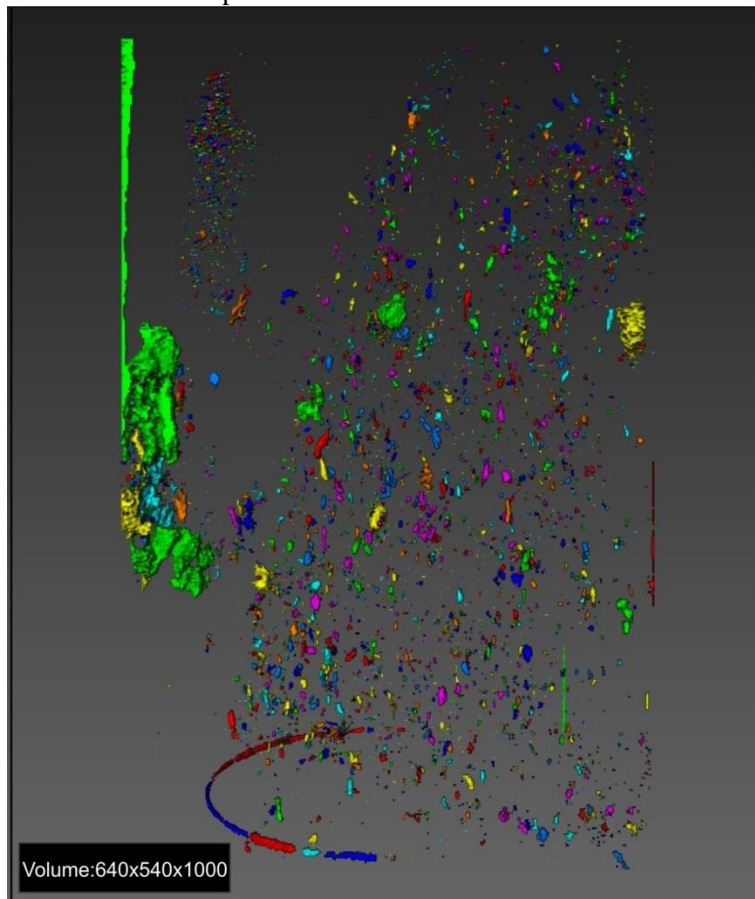
Figura 41 - Sobreposição da imagem binarizada na reconstrução bidimensional nos três eixos da amostra (YZ, XY e XZ), com baixa porosidade e permeabilidade. Poros em azul.



Fonte: Do Autor, 2016.

A renderização do volume comprova que, a porosidade efetiva da amostra foi gerada pelos processos dissolutivos, com poros dispersos ao longo da amostra, com exceções de alguns pontos nos quais a dissolução aparenta ter sido mais efetiva, pois os poros maiores não apresentam nenhuma morfologia característica de outros tipos de porosidade (Figura 42).

Figura 42 - Reconstrução 3D do meio poroso da amostra BG, com poros provenientes de dissolução esparsos na imagem, com eventuais vesículas. Os poros de dissolução são maiores do que em amostras não brechadas, pois o material remobilizado é mais fino, logo, mais suscetível ao intemperismo.



Fonte: Do Autor, 2016.

Desta forma, é possível observar três processos de formação de porosidade na rocha. O primeiro está relacionado ao escape de voláteis, favorecendo a geração de vesículas, estas posteriormente preenchidas. O segundo processo é o fraturamento que gerou a brecha e remobilização do material da rocha. No entanto, estas fraturas também foram

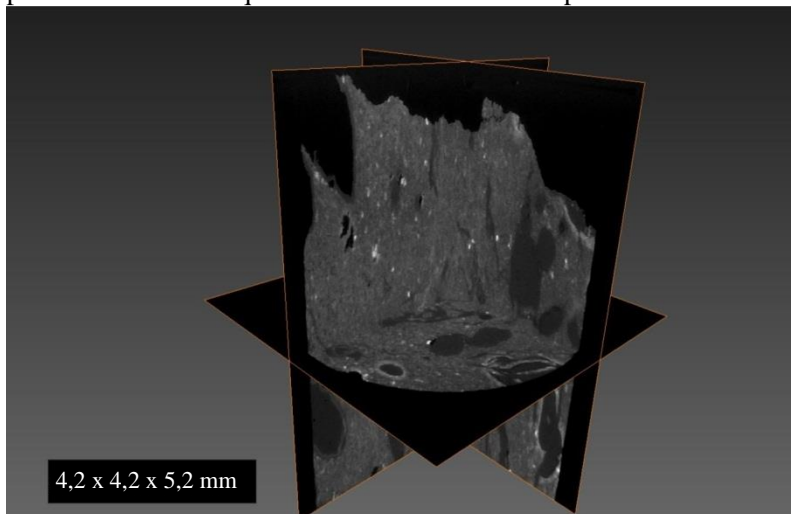
preenchidas. Logo, o processo formador da porosidade da rocha é secundário, representado pela dissolução da matriz, dos minerais precipitados nas amígdalas e do material remobilizado pelo brechamento.

4.3.2 SR

Esta amostra da litofácies brecha escoriácea maciça de topo de derrame foi coletada na cidade de São José do Cerrito, no estado de Santa Catarina, pelo Professor Dr. Breno Leitão Waichel. Foi anteriormente descrita por Becker (2014), como sendo constituída por uma matriz microcristalina (80%) com pequenos cristais de plagioclásio, piroxênio e minerais opacos que não ultrapassam 0,2 mm de comprimento. Apresenta uma porosidade original que pode ser estimada em aproximadamente 20% da amostra, mas a grande maioria encontra-se preenchida por zeolita e celadonita.

Assim como na descrição petrográfica, na reconstrução microtomográfica bidimensional também é observada uma matriz microcristalina e grandes vesículas preenchidas por minerais secundários, sendo as zeolitas observadas em tons de cinza mais claro e celadonitas mais escuras em razão da sua maior densidade (Figura 43).

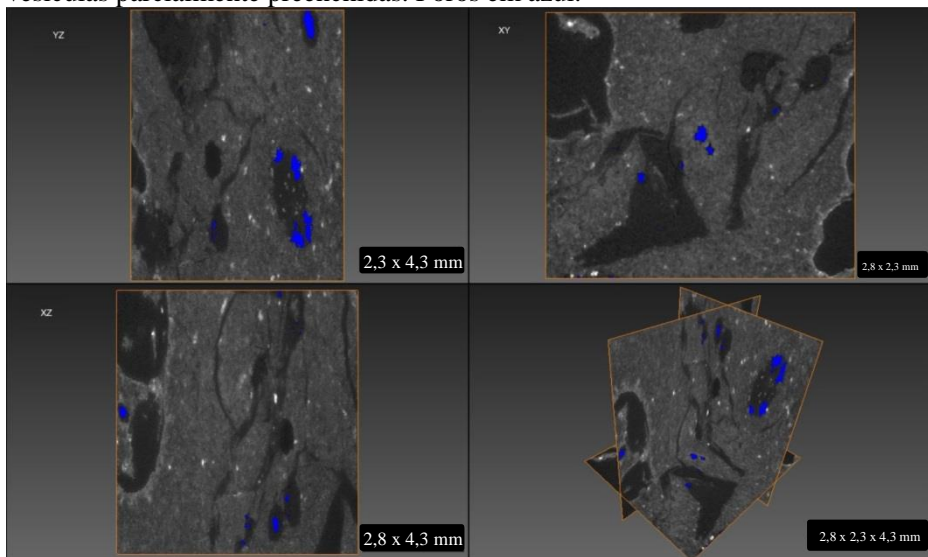
Figura 43 - Reconstrução microtomográfica bidimensional da amostra SR, quebrada durante o processo de confecção do plugue. Possui grande quantidade de vesículas preenchidas (total e parcialmente), com porosidade formada quando não estão totalmente preenchidas.



Fonte: Do Autor, 2016.

As porosidades observadas são oriundas da dissolução dos minerais secundários que preenchem vesículas, e quando não preenchidas, as próprias vesículas formam poros (Figura 44).

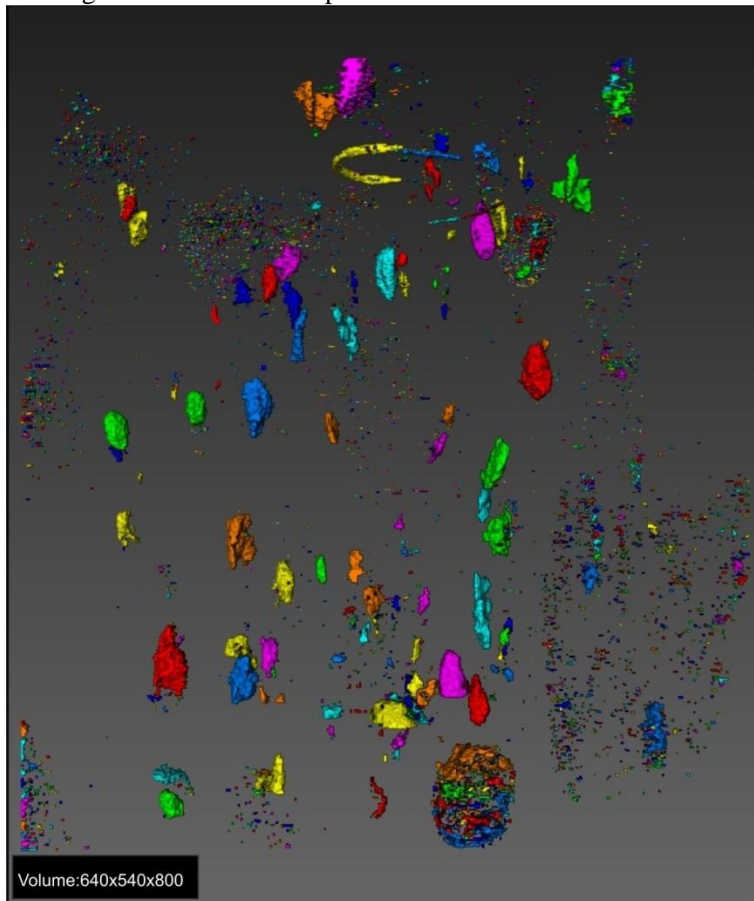
Figura 44 - Binarização sobrepono a reconstrução bidimensional nos três eixos (YZ, XY e XZ), com baixa porosidade e esta oriunda de vesículas parcialmente preenchidas. Poros em azul.



Fonte: Do Autor, 2016.

Na reconstrução 3D, os poros são escassos e estão dispersos na amostra, mas em geral concentrados dentro das vesículas preenchidas. Esses são pontuais e não possuem conectividade. Também são observados poros contínuos e com morfologia melhor definida, atribuídos aos processos de exsolução de voláteis, favorecendo a formação de vesículas. Esta amostra passou por três processos até formar sua atual porosidade. Primeiro, com processos primários de formação de vesículas, posteriormente preenchidas por minerais secundários que precipitaram em seu interior, por fim submetidos a processos intempéricos de dissolução (Figura 45).

Figura 45 - Imagem tridimensional no meio poroso da amostra, evidenciando os poros oriundos de processos dissolutivos (pontuais e dispersos), daqueles vesiculares (maiores e contínuos). Na parte inferior da imagem há uma vesícula parcialmente dissolvida.



Fonte: Do Autor, 2016.

Nesta amostra é possível observar como processos secundários (dissolução, precipitação de minerais secundários) podem contribuir tanto para aumentar como para diminuir a porosidade da rocha. Apesar da amostra possuir porosidade secundária, não há uma classificação específica para a dissolução destes tipos de minerais (celadonita e

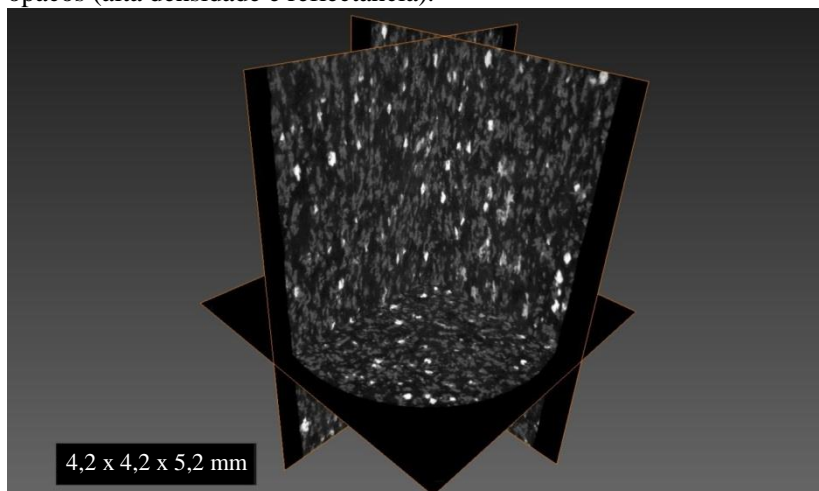
zeolita) segundo Zou et al. (2013). No entanto, a porosidade primária é caracterizada como vesicular.

4.3.3 S5

Esta amostra da litofácies basalto microvesiculado de núcleo de derrame foi coletada na cidade de Herveiras, no estado do Rio Grande do Sul, pelo Professor Dr. Breno Leitão Waichel. Descrições petrográficas desta amostra não foram anteriormente realizadas.

Como esperado de uma amostra de núcleo de derrame *rubbly pahoehoe*, a reconstrução microtomográfica bidimensional apresenta pequena quantidade de vesículas. No entanto, sua porosidade pode ser atribuída aos processos de segunda ebulição, com formação de microvesículas (Figura 46).

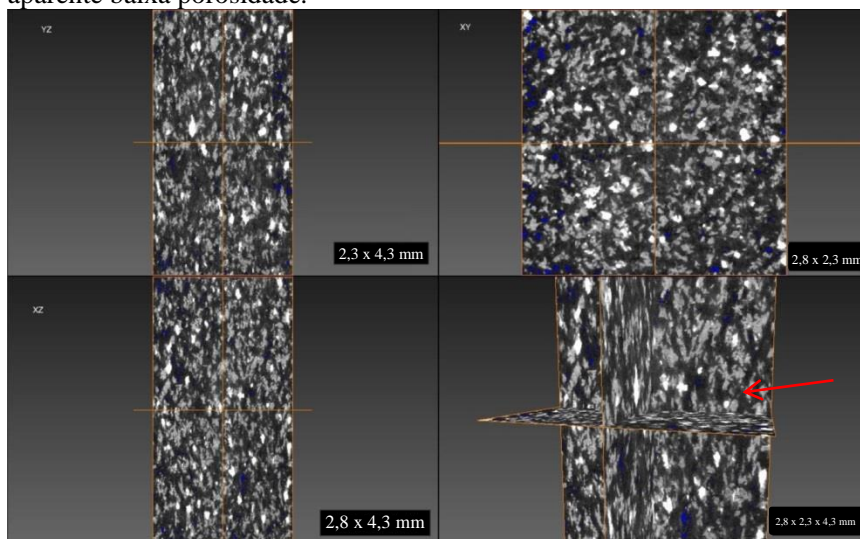
Figura 46 - Reconstrução microtomográfica bidimensional da amostra S5, com poucos espaços vazios aparentes e alta densidade de cristais opacos (alta densidade e reflectância).



Fonte: Do Autor, 2016.

No entanto, em razão da alta densidade de pequenos poros, processos secundários não podem ser descartados. Nas imagens 2D ainda é possível observar uma possível fratura cortando a amostra (indicada pela seta). Esta fratura aparenta contribuir pouco para a porosidade total da rocha (Figura 47).

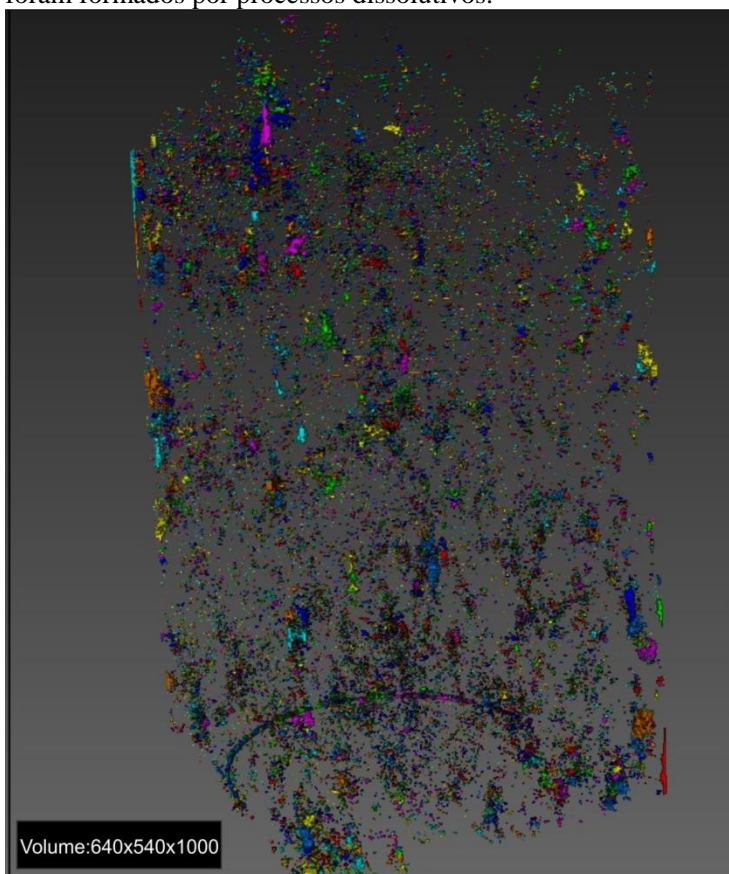
Figura 47 - Imagem binarizada sobrepondo a reconstrução 2D da amostra, com poros pontuais e dispersos nos três eixos (YZ, XY e XZ) e aparente baixa porosidade.



Fonte: Do Autor, 2016.

A reconstrução tridimensional da amostra mostra que as microvesículas, assim como os demais poros, estão dispersos e não conectados. A porosidade gerada pela fratura é incipiente. Desta forma, a rocha apresenta três tipos de porosidade: uma primária microvesicular, uma secundária gerada por processos de dissolução e uma proveniente da fratura, sem elementos conclusivos para defini-la como estrutural ou de contração (Figura 48).

Figura 48 - Sólido 3D do meio poroso da amostra, com poros poucos expressivos em volume e área, comprovando que em sua grande maioria foram formados por processos dissolutivos.



Fonte: Do Autor, 2016.

O poro gerado pela fratura, apesar de pouco expressivo nesta amostra, pode ser um importante fator para interligar o meio poroso da rocha e gerar uma porosidade efetiva a partir de poros mortos. São de extrema importância, pois interconectam o espaço poroso da rocha e, consequentemente, aumentam sua capacidade de reservatório (ZOU et al., 2013).

4.4 Derrame ácido (NP1B)

Esta amostra de base de derrame foi coletada na cidade de Nova Pádua, no estado do Rio Grande do Sul, pelo Professor Dr. Breno Leitão Waichel. Não há descrições petrográficas prévias sobre esta amostra (Figura 49).

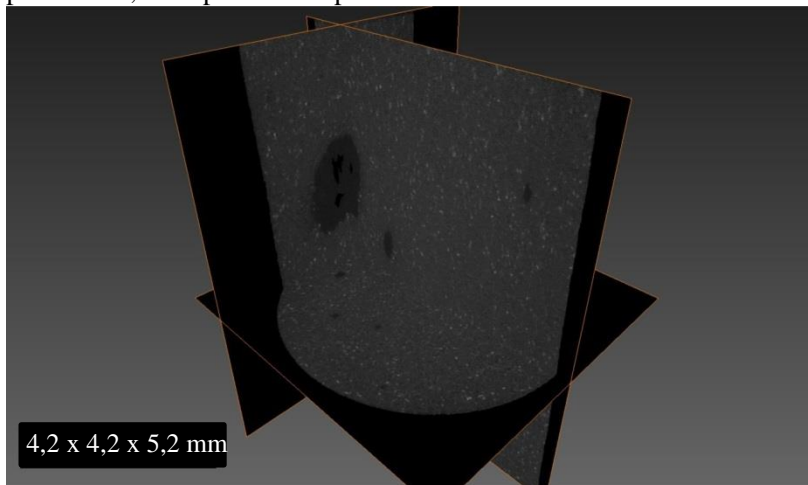
Figura 49 - Amostra do derrame ácido NP1B.



Fonte: Do Autor, 2016.

Na reconstrução tomográfica 2D observa-se uma rocha com tamanho de cristal muito fino (Figura 50), de difícil identificação e quase sem nenhuma porosidade, com “manchas” mais escuras de um material pouco denso que preenche (total ou parcialmente) cavidades da amostra.

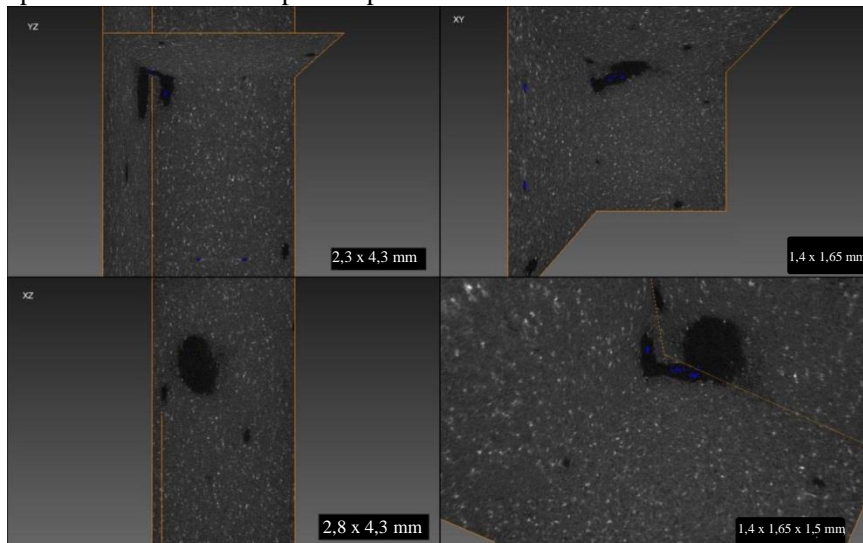
Figura 50 - Reconstrução microtomográfica bidimensional da amostra NP1B, com textura muito fina, sendo muito difícil identificar sua mineralogia. No centro da amostra há uma cavidade parcialmente preenchida, não apresentando processos dissolutivos.



Fonte: Do Autor, 2016.

As cavidades da amostra apresentam-se responsáveis pela grande parte da porosidade seja por ainda possuírem espaços vazios (sem material precipitado) ou por processos dissolutivos posteriores no material que as preenchem (Figura 51).

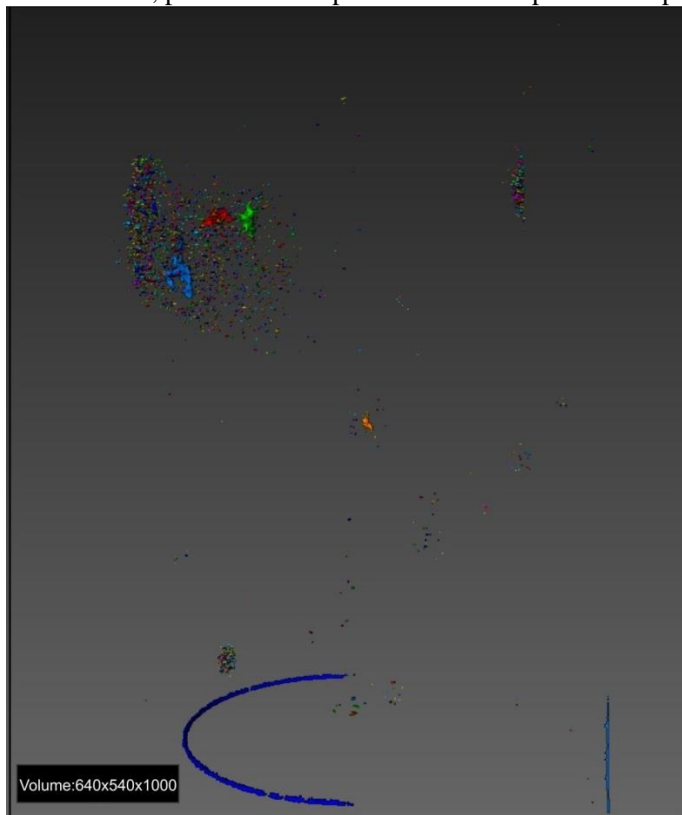
Figura 51 - Imagem binarizada sobrepondo a reconstrução microtomográfica nos três eixos (YZ, XY e XZ), com baixa porosidade em todos eles. Enfoque para a cavidade parcialmente preenchida, aparentando ser o único poro expressivo da amostra. Poros em azul.



Fonte: Do Autor, 2016.

Quanto à reconstrução tridimensional é possível visualizar os pontos em que a amostra apresenta cavidades e a diferença quando estas não se apresentam preenchidas ou quando estão com o preenchimento dissolvido. Se o material é dissolvido, a porosidade gerada é mais pontual, dispersa e dificilmente interconectada, mas quando não se apresenta preenchida (cavidade), o poro é contínuo e possui uma tendência morfológica (Figura 52).

Figura 52 - Reconstrução 3D do meio poroso da amostra, com focos de dissolução, em que o material dissolvido é mais fino do que a rocha. Além disso, há uma grande cavidade dissolvida, apresentando certa continuidade, possivelmente por não estar completamente preenchida



Fonte: Do Autor, 2016.

Desta forma, pela classificação proposta por Zou et al. (2013), a amostra possui porosidade primária representada pelas cavidades. No entanto, os autores não definem um nome específico para tal, além de uma porosidade secundária gerada pelos processos intempéricos dissolutivos do material que preenche as cavidades. Pela tendência evolutiva e morfologia dos poros, o aumento do grau intempérico tenderá a formar poros secundários do tipo cavidade de dissolução, no mesmo local em que anteriormente estavam as cavidades primárias.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi abordada a caracterização dos tipos de porosidade de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral por meio de processamento e análise de imagens adquiridas pela microtomografia de raios-X de radiação síncrotron, baseando-se em classificações do meio poroso já existente para este tipo de rocha.

As imagens geradas apresentaram problemas devido às limitações das câmeras CCD, pois foram observados efeitos de *ring artifact*. Este artefato torna-se evidente nos sólidos tridimensionais gerados, com anéis contínuos localizados nas extremidades das amostras. Outro problema foi gerado na escolha da região de interesse da amostra, em que o mesmo tamanho foi utilizado para todas (640x580x1000), fazendo com que algumas amostras (extremidades mais irregulares) apresentassem barras contínuas em suas laterais. Desta forma, esses artefatos não foram considerados como poros para a caracterização das amostras.

Grande parte das amostras possui porosidade primária originada em processos de exsolução de voláteis, que favorece a formação de vesículas, estas evidenciadas principalmente nas amostras GUAP, S1 e SR. Outro tipo de poro gerado neste processo são microvesículas. Estas geralmente são de difícil identificação, com tamanho reduzido e morfologia irregular, formadas em processos de segunda ebulição, quando há poucos espaços vazios restantes na rocha e a maior parte dos minerais está cristalizada. Este tipo de porosidade está mais evidente nas amostras S1, S2 e S3. Processos de fraturamento e formação de brechas foram observados em algumas amostras (BG e S5), mas sem porosidade efetiva gerada diretamente por eles. No entanto, com exceção de microvesículas, a maior parte dos poros gerados nesses processos primários contém minerais precipitados em seu interior.

Porém, apesar de processos secundários diminuírem a porosidade efetiva de rochas, estes também podem favorecer a formação de poros. O processo de dissolução foi observado em todas as amostras, em sua grande maioria dissolvendo o próprio material precipitado no interior de vesículas, pois este é mais fino e suscetível às intempéries do que o restante da rocha. A dissolução desse material pode ser observada nas imagens 3D do meio poroso de todas as amostras, com um grande número de poros pontuais formando a morfologia original da vesícula. Este processo é mais bem evidenciado as amostras NP1B, SR e S2, com

a última apresentando a dissolução das bordas de cristais de plagioclásio.

Outra amostra que apresenta dissolução de materiais precipitados em vesículas é a S6, mas os poros formados são angulosos e com tendência morfológica, o que pode indicar a dissolução de minerais euédricos.

Apesar da baixa variedade de tipos de poros observados nas amostras, a microtomografia de raios-X por radiação síncrotron se mostrou eficaz para a identificação da porosidade e interpretação dos processos formadores do meio poroso. No entanto, a técnica apresenta limitações na identificação de minerais, pois a orientação cristalográfica é desconhecida. Logo, dois cristais sobrepostos podem ser erroneamente identificados como um.

Portanto, sugere-se a integração de técnicas, como microtomografia de raios-X e petrografia, para um entendimento completo do meio poroso da rocha, mineralogia e seus processos formadores.

Tabela 3 – Tipos de porosidade encontrados por amostra, juntamente com o tipo de derrame e sua estruturação interna.

<u>TIPO DE POROSIDADE POR AMOSTRA</u>					
<u>AMOSTRA</u>	<u>TIPO DE POROSIDADE</u>				<u>TIPO DE DERRAME</u>
	<u>VESICULAR</u>	<u>MICROVESICULAR</u>	<u>DISSOLUÇÃO</u>	<u>FRATURA</u>	
GUA-P	×				PAHOEHOE TOPO
BG-1				×	RUBBLY PAHOEHOE TOPO
SR	×	×	×		RUBBLY PAHOEHOE TOPO
S1	×				PAHOEHOE TOPO
S2		×	×		PAHOEHOE TOPO
S3		×			PAHOEHOE BASE
S5				×	RUBBLY PAHOEHOE NÚCLEO
S6			×		PAHOEHOE BASE
NP1B			×		ÁCIDO BASE

Fonte: Do Autor, 2016.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. (Coord.) **O Pré-Cambriano do Brasil**. 1. Ed. São Paulo, SP: Edgar Blucher, 1984.

ALMEIDA, F.F.M. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós Paleozóico no Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16, p. 325-439, dez., 1986.

ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R.; BARTORELLI, A.: Magmatismo pós-Paleozóico no Brasil. In: HASUI, Y. et al. (Org.). **Geologia do Brasil**. São Paulo: Beca, 2012, p.430-452.

APPOLONI, C. R.; FERNANDES, C. P.; RODRIGUES, C. R. O. X-ray microtomography study of a sandstone reservoir rock. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, Coimbra, v. 580, n. 1, p. 629-632, set., 2007.

ARCHIE, G.E. Introduction to petrophysics of reservoir rocks. **AAPG Geologists Bulletin**, Reston, v. 34, n. 5, p.943-961, maio, 1950.

AUBELE, J.C.; CRUMPLER, L.S.; ELSTON, W.E. Vesicle zonation and vertical structure of basalt flows. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, Boulder, v. 35, n. 4, p. 349-374, dez., 1988.

BAI, L.; BAKER, D. R.; RIVERS, M. Experimental study of bubble growth in Stromboli basalt melts at 1 atmosphere. **Earth and Planetary Science Letters** v. 267, n. 3-4, p. 533-547, mar., 2008.

BAKER, D. R. et al. An introduction to the application of X-ray microtomography to the three-dimensional study of igneous rocks. **Lithos**, v. 148, p. 262-276, set., 2012.

BARRETO, C.J.S. et al. Lithofacies analysis of basic lava flows of the Parana igneous province in the south hinge of Torres Syncline, Southern Brazil. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**. v. 285, p. 81-99, set., 2014.

BECKER, M. **Caracterização petrográfica e petrofísica de litofácies vulcânicas da Formação Serra Geral**. 2014, 66 p. Trabalho de

Conclusão de Curso - Graduação em Geologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

BELLIENI, G. et al. High- and Low Ti flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. **Neues Jahrbuch für Mineralogie**, Stuttgart, v. 150, p. 272-306, 1984.

CHEN, Z.Y.; HUO, C.Y.; ZHANG, Z.W. Relationship between Tertiary volcanic rocks and hydrocarbons in the Liaohe basin. China. **AAPG Bulletin**, v. 83, n. 6, p. 1004–1014, jun., 1999.

CHOQUETTE, P. W.; PRAY, L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **AAPG Bulletin**, v. 54, n. 2, p. 207-205, fev., 1970.

CNUUDE, V. et al. Recent progress in X-ray CT as geosciences tool. **Applied Geochemistry**, v. 21, n. 5, p. 826-832, maio, 2006.

CNUUDE, V.; BOONE, M.N. High resolution X-ray computed tomography in geosciences: a review of the current technology and applications. **Earth Science Reviews**, v. 123, p. 1-17, ago., 2013.

DURAI SWAMI, R.A.; BONDRE, N.R.; MANAGAVE, S. Morphology of rubbly pahoehoe (simple) flows from the Deccan Volcanic Province: Implications for style of emplacement. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 177, n. 4, p. 822-836, nov., 2008.

DURAI SWAMI, R.A. et al. Pahoehoe-a'a transitions in lava flow fields of the western Deccan Traps, India-implications for emplacement dynamics, flood basalt architecture and volcanic stratigraphy. **Journal of Asian Earth Science**, v. 84, p. 146-166, abril, 2014.

FAROOQUI, M.Y. et al. Evaluating Volcanic Reservoirs. **Oilfield Review Spring**, v. 21, n. 1, p. 36-47, mar., 2009.

FENG, Z. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: a case study from the Qingshen gasfield in the Songliao Basin, NE China. **Mar. Petrol. Geol.** v. 25, n. 4-5, p. 416–432, abril-maio, 2008.

FERNANDES, C.P. et al. Caracterização do sistema poroso de rochas-reservatório com microtomografia computadorizada de raios X. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 20, n. ½, p. 129-144, nov. 2011/ nov. 2012.

FERNANDES, J.S. **Caracterização microestrutural do espaço poroso de rochas reservatório da bacia do rio Tibagi por microtomografia de raios X**. 2009. 208 p. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

FLANNERY, B. P. et al. Three-dimensional X-ray microtomography. **Science**. v. 237, n. 4821, p. 1439-1444, set., 1987.

FRANK, H.T.; GOMES, M.E.B.; FORMOSO, M.L.L. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. **Pesquisas em Geociências**, v. 36, n.1, p. 49-57, jan., 2009.

FORSBERG, F. **X-ray microtomography and digital volume correlation for internal deformation and strain analysis**. 2009, 194 p. Tese (Doutorado) - Lulea University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering – Division of Experimental Mechanics, Lulea, 2008.

GORDON, J.M. Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. **Notas preliminares e estudos**, DNPM/DGM, Rio de Janeiro, n. 38, p. 1-20, 1947.

GUILBAUD, M. et al. Rubbly pahoehoe lavas: An important component of icelandic basaltic lava flows In: AGU FALL MEETING, dez. 2003, San Francisco, CA: **Eos Transactions American Geophysical Union**, 2003.

KESZTHELYI, L. Classification of the mafic flows from OPD Leg 183. In: Proceedings of the Ocean Drilling Program.; FREY et al. (Eds.). **Scientific Results**, v. 183, p. 1-28, jun., 2002.

KNACKSTEDT, M. A. et al. 3D imaging and flow characterization of the pore space of carbonate core samples. In: INTERNATIONAL

SYMPOSIUM OF THE SOCIETY OF CORE ANALYSTS, set. 2006, Dublin, CA: **Society of Core Analysts**, 2006.

LANDIS, E.N.; KEANE, D.T. X-ray microtomography. **Material characterization**, v. 61, n. 12, p. 1305-1316, dez., 2010.

LENHARDT, N.; GOTZ, A.E. Volcanic settings and their reservoir potential: an outcrop analogue study on the Miocene Tepoztlán Formation, Central Mexico. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 204, n. 1-4, p. 66-75, jul., 2011.

LOPES, A.P. et al. Análise tridimensional de rochas por meio de microtomografia computadorizada de raios X integrada à petrografia. **Geociências**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 129-142, 2012.

LUO, J. et al. Controls of the quality of Archean metamorphic and Jurassic volcanic reservoir rock from the Xinglongtai buried hill, western depression of Liahoe basin, China. **AAPG Bulletin**, v. 89, n. 10, p. 1319-1346, out., 2005.

MACDONALD, G. A. Pahoehoe, aa and block lava. **American Journal of Science**, v. 251 n. 3, p. 169-191, mar., 1953.

MACHADO, A.C. **Estudo de acidificação em rochas carbonáticas utilizando microtomografia por transmissão de raios X**. 2016, 122 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MANTOVANI, I.F. **Microtomografia e nanotomografia de raios X aplicada à caracterização multiescalar de sistemas porosos carbonáticos**. 2013, 168 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MANTOVANI, M. et al. Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State, southern Brazil. **Journal of Petrology**, v. 26, n. 1, p. 187-209, jun., 1985.

MARQUES, E.A.R. **Caracterização de reservatório petrolíferos: Análise comparativa de dois métodos para a caracterização de propriedades de um reservatório petrolífero.** 2011, 99 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

MARQUES, L.S.; ERNESTO, M. O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. In: MANTESSO NETO et al. (Eds.). **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, São Paulo: Beca, 2004. p. 245-263.

MILANI, E.J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental.** 1997, 2 v., 255 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MILANI, E.J.; RAMOS, V.A. Orogenias Paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 4, p. 473-484, jan., 1998.

MILANI, E.J. et al. Petróleo na margem continental brasileira: Geologia, exploração, resultados e perspectivas. **Brazilian Journal of Geophysics**, vol. 18, n. 3, p. 351-396, dez., 2001.

MILANI, E.J. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: MANTESSO NETO et al. (Eds.). **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, São Paulo: Beca, 2004 p. 265-279.

MILANI, E.J. et al. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, maio/nov., 2007.

MINCATO, R.L. **Metalogenia dos elementos do grupo da platina com base na estratigrafia e geoquímica da Província Ígnea Continental do Paraná.** 2000, 172 p. Tese (Doutorado), Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2000.

MOREIRA, A.C. **Análise da influência da morfologia porosa de implantes de titânio no processo de crescimento ósseo.** 2013, 157 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências e

Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

NARDY, A.J.R.; MACHADO, F.B.; OLIVEIRA, M.A.F. As rochas vulcânicas mesozóicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 1, p. 178-195, mar., 2008.

PALOMBO, L. et al. Caracterização de rochas reservatório por microtomografia de raios X. **Holos**, v. 5, n. 1, p. 65-72, set., 2015.

POLACCI, M. et al. Large vesicles record pathways of degassing at basaltic volcanoes. **Bulletin of Volcanology**, v. 70, n. 9, p. 1023–1029, set., 2008.

POLACCI, M. et al. Vesiculation in magmas from Stromboli and implications for normal Strombolian activity and paroxysmal explosions in basaltic systems. **Journal of Geophysical Research Solid Earth** v. 114, n. B01206, p. 1-14, jan., 2009.

POLACCI, M. et al. Degassing behaviour of vesiculated basaltic magmas: an example from Ambrym volcano, Vanuatu Arc, and comparison to Stromboli, Aeolian Islands, Italy. **Journal of Volcanology and Geothermal Research** v. 233-234, p. 55–64, jul., 2012.

REIS NETO, J.M. et al. A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade de rochas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 498-508, 2011.

ROSSETTI, L.M. et al. Stratigraphical framework of basaltic lavas in Torres Syncline main valley, southern Parana-Etendeka Volcanic Province. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 56, p. 409-421, dez., 2014.

SCHOBENHAUS, C.; NEVES, B.B.B. A geologia do Brasil no contexto da Plataforma Sul-Americana. In: BIZZI, L.A. et al. (Eds.) **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**. Brasília: CPRM, 2003, p. 5-54

SILVA, A.J.P. et al. Bacias sedimentares paleozoicas e meso-cenozoicas interiores. In: BIZZU, L.A. et al. (Eds.) **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**. Brasília: CPRM, 2003, p. 55-85

SILVA, A.M.H. **Análise morfométrica 2D e 3D de amostras de osso trabecular utilizando microtomografia tridimensional por raios X**. 2009, 78 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Bioengenharia, EESC/USP, São Carlos, 2009.

SONG, S. et al. Synchrotron X-ray computed microtomography: studies on vesiculated basaltic rocks. **Bulletin of Volcanology**, v. 63, n. 4, p. 252–263, ago., 2001.

SRUOGA, P; RUBINSTEIN, N.; HINTERWIMMER, G. Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobífera, South Patagonia, Argentina. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 132, n. 1, p. 31-43, abril., 2004.

STEWART, K. et al. 3-D, ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology in the Paraná continental flood basalt province. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 143, n. 1-4, p. 95-109, set., 1996.

TIAB, D; DONALDSON, E.C. **Petrophysics**: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties. 3 ed. Elsevier, 2012.

THIEDE, D.S.; VASCONCELOS, P. Paraná flood basalts: rapid extrusion hypothesis confirmed by new ^{40}Ar - ^{39}Ar results. **Geology**, v. 38, n. 8, p. 747-750, mar., 2010.

TOMBA, C.L.B. **Análise estrutural do enxames de diques máficos eocretáceos do Sul-Sudeste do Brasil**. 2012, 146 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

TORAMARU, A. Measurement of bubble-size distributions in vesiculated rocks with implications for quantitative estimation of eruption processes. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 43, n. 1-4, p. 71-90, out., 1990.

TURNER, S. et al. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 121, n. 3-4, p. 333-348, fev., 1994.

VIEIRA, L.D.; WAICHEL, B. L.; MOURO, L.D. Caracterização dos tipos de porosidade de rochas vulcânicas utilizando microtomografia de raios-X. In: III SEMINÁRIO DO GRUPO DE ANÁLISE DE BACIAS, dez. 2014, Florianópolis, SC, Brasil: **Grupo de Análise de Bacias**, 2014.

WAICHEL, B.L.; LIMA, E.F.; SOMMER, C.A. Tipos de derrame e reconhecimento de estruturas nos basaltos da Formação Serra Geral: Terminologia e aspectos de campo. **Pesquisas em Geociências**, v. 33, n. 2, p. 123-133, dez., 2006.

WAICHEL, B.L. et al. Lava tubes from Paraná-Etendeka Continental Basalt Province: Morphology and importance to emplacement models. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 48, p. 255-261, dez., 2013.

WENTWORTH, C.K.; MACDONALD, G.A. Structures and forms of basaltic rocks in Hawaii. **Geological Survey Bulletin**, v. 994, 98 p. 1953.

WHITE, I.C. **Relatório final da comissão de estudos das minas de carvão de pedra do Brasil**. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1908.

WU, C. et al. Formation mechanisms of hydrocarbon reservoirs associated with volcanic and subvolcanic intrusive rocks: Examples in Mesozoic-Cenozoic basins of eastern China. **AAPG Bulletin**, v. 90, n. 1, p. 137-147, jan., 2006.

ZALÁN, P.V. et al. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, M.W. et al. (Eds.). **Interior cratonic basins**. Tulsa: AAPG Memoir, p. 681- 708, 1990.

ZALÁN, P.V. Evolução Fanerozóica das Bacias Sedimentares Brasileiras. In: MANTESSO NETO et al. (Eds.). **Geologia do continente**

sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, São Paulo: Beca, 2004. p. 552-595.

ZOU, C. **Volcanic reservoirs in petroleum exploration.** China: Petroleum Industry Press, Elsevier, 2013.